

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# NÁVRH KONSTRUKČNÍHO USPOŘÁDÁNÍ VOZIDLA STUDENTSKÉ FORMULE

STUDENT FORMULA ARRANGEMENT DESIGN

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MARTIN NIESNER

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. PAVEL RAMÍK

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2007/08

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Niesner Martin

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Dopravní a manipulační technika (2301T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Návrh konstrukčního uspořádání vozidla studentské formule**

v anglickém jazyce:

#### **Student Formula Arrangement Design**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte návrh celkového uspořádání konstrukčních skupin vozidla Formule Student.

Cíle diplomové práce:

1. Proveďte rešerši současných konstrukčních řešení vozidel studentské formule.
2. Navrhněte celkové uspořádání konstrukčních skupin vozidla s respektováním požadavků daných příslušnými pravidly.
3. S ohledem na celkové uspořádání jednotlivých skupin proveďte konstrukční návrh rámu vozidla.
4. Připravte a proveďte základní výpočtovou analýzu torzní tuhosti navrženého rámu.
5. Proveďte celkové zhodnocení navrženého konstrukčního řešení.

Seznam odborné literatury:

- [1] SAE International student web page [online], 2006, poslední revize 2.10.2006. Dostupné z: <http://students.sae.org>
- [2] Vlk, F: Stavba motorových vozidel, Nakladatelství a vydavatelství Vlk, Brno 2006
- [3] Janíček P., Ondráček E., Vrbka J.: Pružnost a pevnost I, VUT Brno 1992
- [4] Pro/Engineer WildFire 2.0 Resource Center [online], Parametric Technology Corporation, 2006, poslední revize 5.11.2007. Dostupné z: [http://www.ptc.com/community/resource\\_center/proengineer/index.htm](http://www.ptc.com/community/resource_center/proengineer/index.htm)
- [5] Release 10.0 Documentation for ANSYS, ANSYS Inc., USA 2005

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Ramík

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne 20.11.2007



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce pana Ing. Pavla Ramíka a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne 22. května 2008

Martin NIESNER

Podpis:.....

### Poděkování

Za účinnou podporu a obětavou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování diplomové práce tímto děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlu Ramíkovi. Dále chci poděkovat všem, kteří se podílejí na vývoji studentské formule na VUT v Brně.

**Anotace:**

Martin NIESNER

Návrh konstrukčního uspořádání vozidla studentské formule  
DP, ÚADI, 2008, 54 str., 67 obr.

Hlavními vodítky při návrhu rámové konstrukce studentské formule nám budou pravidla soutěže Formula Student, maximální napjatost v materiálu rámové konstrukce pod zatížením, požadavky na prostor pilota, uchycení motoru, jednotlivých náprav, diferenciálu, sání a výfuku motoru, nádrže, ovládacích prvků, a dalších. Celkovou torzní tuhost rámu budeme porovnávat s rámem Formule Ford a s jinými variantami rámu Formule Student.

**Klíčová slova:**

Rám Formule Student, bezpečnost, napjatost, torzní tuhost, hmotnost, těžiště, zástavba motoru, nápravy, sekundární převod.

**Annotation:**

Martin Niesner

Student Formula Arrangement Design  
DW, IAE, 2008, 54pp, 67 fig.

Designing the formula car frame we will investigate: krepiny formula student rules, maximum stress of frame under a load, securing of space for driver, space for engine, double fishbone arms, secondary gear, engine intake, tank, steering wheel, pedals and other. We will compare a torssional stiffness with Formula Ford frame and with another version of Formula Student car frame.

**Keywords:**

Formula Student car frame, safety, stress, torssional stiffness, mass, centre of gravity, fixing of engine, double fishbone arms, secondary gear.

**Bibliografická citace:**

NIESNER, M. Návrh konstrukčního uspořádání vozidla studentské formule. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 54 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík.

## Obsah:

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Formula Student .....</b>	<b>2</b>
2.1	Současnost .....	2
2.2	Historie .....	3
<b>3</b>	<b>Návrh rámu .....</b>	<b>3</b>
3.1	Nápravy .....	4
3.2	Soudobá řešení rámové konstrukce Formule Student .....	5
<b>4</b>	<b>Softwarové prostředky .....</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Požadavky na konstrukci rámu .....</b>	<b>7</b>
5.1	Bezpečnostní požadavky na konstrukci rámu .....	8
5.1.1	Materiálové požadavky .....	8
5.1.2	Povinné bezpečnostní prvky .....	9
5.2	Konstrukční požadavky na rám .....	11
5.2.1	Hmotnost prostorového trubkového rámu .....	11
5.2.2	Torzní tuhost .....	12
5.2.3	Zástavba jednotlivých komponent .....	13
5.3	Zatížení rámové konstrukce .....	16
5.3.1	Krouticí moment motoru .....	16
5.3.2	Vibrace motoru .....	17
5.3.3	Přejíždění nerovností .....	17
5.3.4	Průjezd zatáčkou .....	17
5.3.5	Akcelerace, decelerace .....	17
<b>6</b>	<b>Soudobá řešení trubkových rámu .....</b>	<b>18</b>
<b>7</b>	<b>Zatížení rámu .....</b>	<b>19</b>
7.1	Zatížení krutem .....	19
7.2	Zatížení ohybem .....	20
<b>8</b>	<b>Postup konstrukce rámu .....</b>	<b>20</b>
8.1	Rámové konstrukce 1. generace .....	20
8.2	Vývojové stupně 2. generace prostorového trubkového rámu .....	22
<b>9</b>	<b>Finální podoba rámu před výpočtovou analýzou .....</b>	<b>27</b>
9.1	Použitý materiál, profily .....	28
9.2	Těžiště a hmotnost rámové konstrukce .....	28
<b>10</b>	<b>Analýza napjatosti .....</b>	<b>29</b>
10.1	Zatížení krutem .....	30
10.2	Zatížení ohybem .....	31
10.3	Výpočet torzní tuhosti .....	34
<b>11</b>	<b>Úprava použitých profilů na rámu .....</b>	<b>37</b>



11.1	Výpočet zatížení krutem.....	38
11.2	Výpočet zatížení ohybem .....	40
11.3	Výpočet torzní tuhosti .....	42
<b>12</b>	<b>Výztuhy .....</b>	<b>42</b>
<b>13</b>	<b>Analýza výsledků .....</b>	<b>45</b>
13.1	Porovnání dosažených výsledků .....	45
13.1.1	Formule FORD.....	47
13.1.2	První generace rámové konstrukce .....	48
13.2	Návrh opatření.....	48
<b>14</b>	<b>Kompletace jednotlivých komponent monopostu.....</b>	<b>49</b>
<b>15</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>51</b>
<b>16</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>53</b>
<b>17</b>	<b>Seznam použitých symbolů a zkratek.....</b>	<b>54</b>

## 1 Úvod

Předmětem této diplomové práce je návrh konstrukční varianty trubkového rámu studentské formule a následná kompletace jednotlivých částí, jako jsou nápravy, těhlice a jiné, do jednoho celku v 3D CADu. Náplní práce bude seznámení se s předpisy poháru Formula Student vydané společností SAE (dále již bezpečnostní pravidla), s konstrukčním řešením konkurenčních týmů, s konstrukčním řešením předchůdců, dále návrh vhodné varianty rámu, převod do MKP, provedení zatížení, detekce kritických míst konstrukce, porovnání s již existujícími návrhy.

Primární funkcí rámu je ochrana zdraví pilota. Rám musí vytvořit kolem pilota tzv. ochrannou zónu, která musí odolat čelnímu nárazu, bočnímu nárazu, převrácení vozidla či jiné nehodě, která může nastat. Při všech těchto stavech je ochrana zdraví a života pilota na prvním místě.

Požadavky na bezpečnost podléhají bezpečnostním pravidlům a jsou bedlivě hlídány. Je kladen zřetel nejen na použité profily jednotlivých komponent, ale také na materiál, ze kterého jsou vyrobeny.

Rám je v podstatě hlavní nosnou částí celého monopostu. Z jedné strany je svázán nároky bezpečnostních předpisů a na straně druhé jsou požadavky a uchycení náprav, motoru, sekundárního převodu, řízení, palivové nádrže, sání, výfuku, chladicího systému, systému ovládání monopostu a jiné.

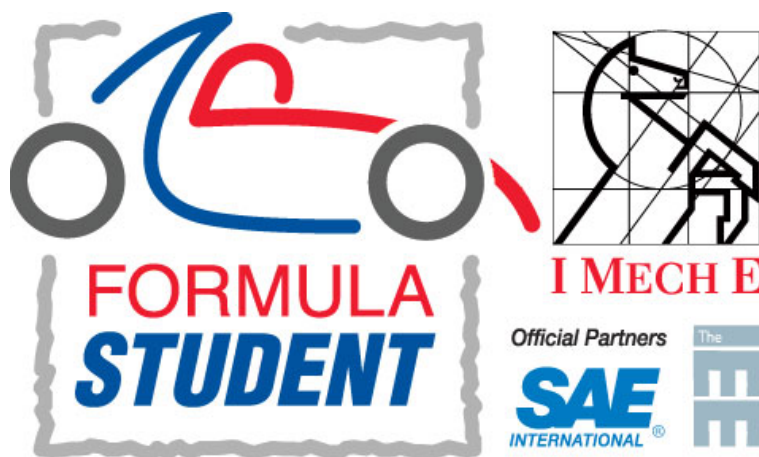
Těmto náročným požadavkům nejlépe vyhovují dvě konstrukční řešení. Jedná se o prostorový trubkový rám a skořepinovou konstrukci nejčastěji z kompozitního materiálu, doplněnou pomocnými trubkovými rameny. V našem případě bude preferována první z jmenovaných variant.

Trubková konstrukce rámu dosahuje dobré tuhosti, vyniká jednoduchostí, snadnou dostupností použitých trubkových profilů a nenáročnou vyrobiteľností svařováním a tedy i nízkou cenou. U této konstrukce se poměrně snadně provádí analýza napjatosti. Je léty prověřena v nejrůznějších závodních strojích. I dnes se s ní lze setkat na závodních okruzích. Na druhou stranu je nutné podotknout, že vývoj nelze zastavit, a proto se objevují u moderních závodních formulí (např. Formula 1) skořepinové konstrukce z kompozitů, které jsou lehčí a vykazují větší tuhost. To vše vede k lepším jízdním vlastnostem a tedy i lepším výsledkům v soutěžích.

Na druhou stranu jsou tyto skořepinové konstrukce z kompozitů nákladné na výrobu. Proto se od této varianty v primární fázi vývoje odstoupilo. Nicméně nic nebrání tomu, aby další vývojové stupně již kompozitní skořepinovou konstrukce neměly.

## 2 Formula Student

**Formula student** je soutěž, která je organizována Institucí Strojních Inženýrů (Institution of Mechanical Engineers – ImechE), s podporou partnerů a sponzorů Institution of Engineering & Technology (IET), RS Components, Shell a SolidWorks.



Obr. 1 Oficiální logo Formule Student [3]

### 2.1 Současnost

Této soutěži se účastní studentské týmy technických univerzit z celého světa. Týmy mají možnost navrhnout, postavit a provozovat malý jednomístný formulový vůz. Soutěž probíhá v Evropě, Americe a Austrálii. Aby se mohly týmy zúčastnit, je třeba aby vyvíjely každý rok nový vůz. Vozy jsou poháněny převážně motocyklovými motory, a proto je také využívána převodovka z motocyklu. Zbývající části monopostu jsou navrhovány studenty.

Formula Student jako soutěž je striktně omezena pravidly, tak jak je tomu u profesionálního motorsportu odvyklé. Pravidla jsou zaměřena především na bezpečnost, dále také na základní rozměry monopostu, zdvihový objem použitého hnacího agregátu a podobně.

Pro každou univerzitu, která se rozhodne účastnit se této soutěži, představuje účast nejen prestižní záležitost, ale především možnost, jak rozvíjet talent mladých konstruktérů v automobilovém průmyslu. Studenti, účastníci se na tomto projektu, se vlastně již na škole potýkají s problémy, které v praxi budou na denním pořádku. Práce v týmu je pro úspěch celého podniku velice důležitá.

Jednotlivé týmy se setkávají na pravidelných mítincích v Anglii, kontinentální Evropě, Americe, Asii i Austrálii. Každým rokem se těchto turnajů účastní okolo 140 týmů.

Hodnocení týmů, potažmo vozů se provádí podle následujících kritérií:

- Jízdní vlastnosti – akcelerace, brzdění, ovladatelnost – zjišťuje se praktickou zkouškou v místě konání akce.
- Celková cena vozu - jednoduchost konstrukce, možnosti údržby, design vozu, originalita, použití společných či unifikovaných snadno dostupných součástí, spotřeba paliva, prezentace týmu a schopnost komerčního využití projektu.

Úkol týmu je tedy jednoduchý. Navrhnout a zkonstruovat prototyp monopostu co možná nejlépe splňující požadavky v porovnání s konkurenčními stroji. Tento úkol není jednoduchý, protože konkurenční týmy jsou na velmi vysoké úrovni.

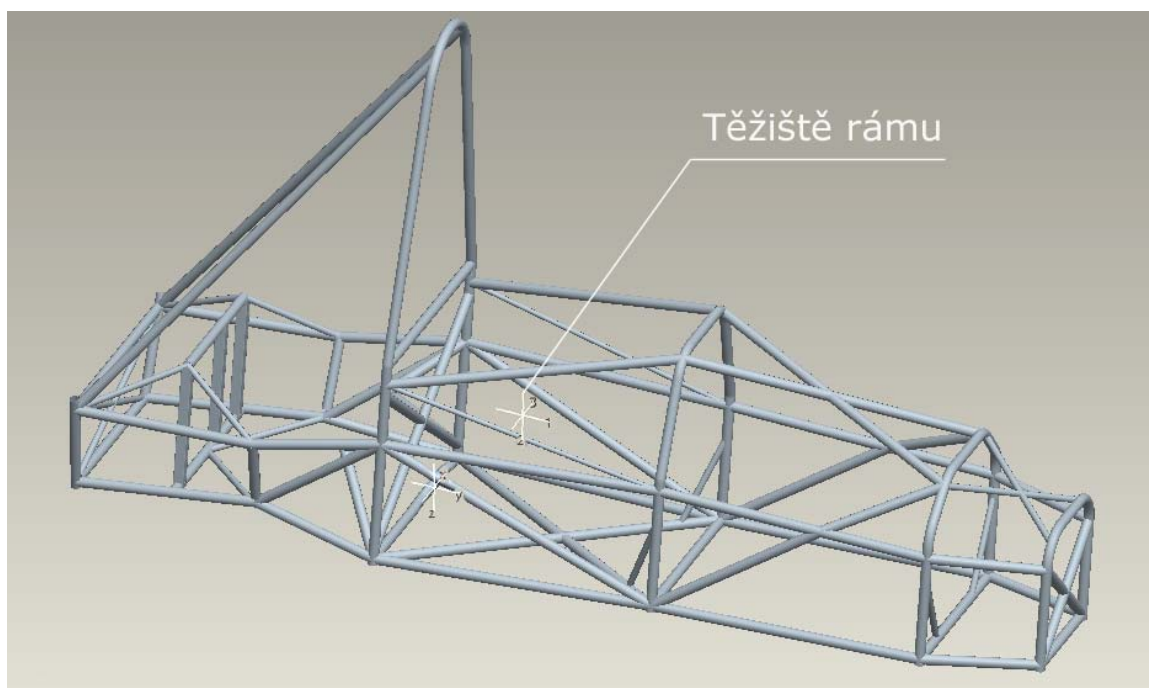
## 2.2 Historie

Od roku 1981 se začíná psát historie Formula Student. Organizace SAE (Society of Automotive Engineers) uspořádala první ročník pod názvem Formula SAE. Na britské půdě roku 1998 proběhla předváděcí akce, které se účastnily dva monoposty z Ameriky a dva monoposty z Anglie. Odborná veřejnost tuto akci vyhodnotila jako velice úspěšnou a přínosnou pro studenty i pro jejich budoucí kariéru. Řízení evropské Formule Student se ujala organizace ImechE nezávisle na americké Formuli SAE. Pro obě organizace platí velice podobná pravidla, proto je možné, aby se jeden monopost mohl zúčastnit obou soutěží.

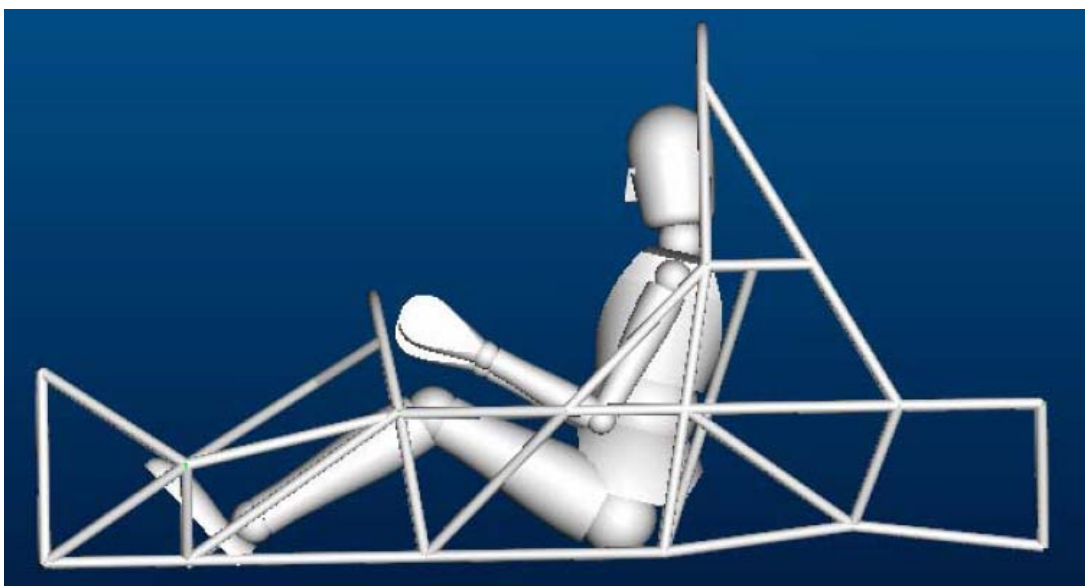
Bruntingthorpe v Anglii se stal již tradičním místem konání soutěžního klání. Akce trvá tři dny v červenci. Bruntingthorpe se nachází přibližně 8 mil jižně od Leicesteru.

## 3 Návrh rámu

Jak již bylo v úvodu řečeno, bude se návrh nosné konstrukce studentské formule ubírat cestou trubkového rámu, protože trubkové konstrukce byla použity i v loňském roce. Na **obrázku č. 2 a č. 3** jsou uvedeny tyto trubkové konstrukce. Oba dva návrhy byly použity jako výchozí bod pro návrh nového rámu.



**Obr. 2** Rámová konstrukce Ing. Hajduška [5]

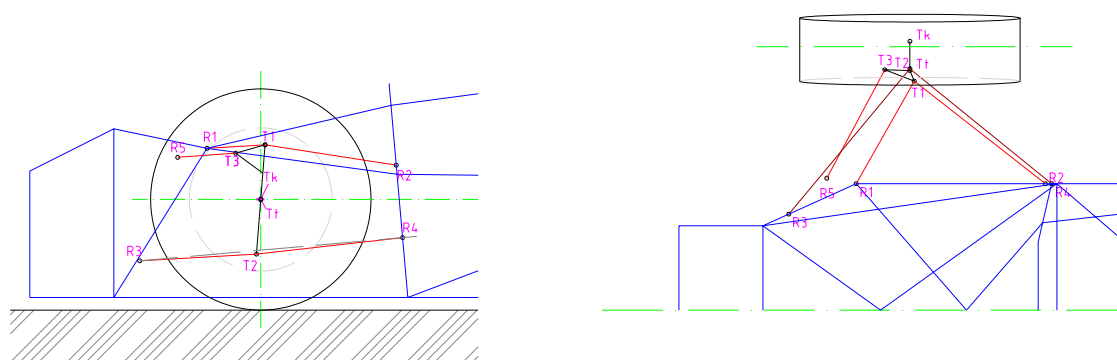


Obr. 3 Rámová konstrukce Ing. Kolavíka [6]

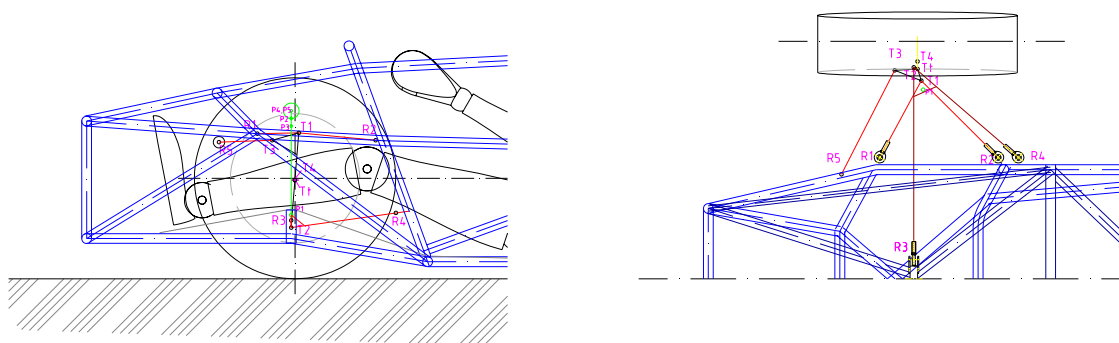
### 3.1 Nápravy

Po podrobném prostudování obou rámců a dalších konstrukčních celků, které již byly navrženy v akademickém roce 2006/07, bylo zřejmé, že je třeba udělat řadu změn. Jako první přišly na řadu nápravy a paralelně s nápravami vznikala i ráma.

Bylo třeba změnit především geometrii kinematiky přední a zadní nápravy. Tohoto úkolu jsme se zhostili s kolegou Pavlem Tomáškem, který pracoval na zadní nápravě. Po několika neúspěšných pokusech na přední nápravě, viz **obrázek č. 4**, kde byly nedostatky převážně v průběhu sbíhavosti při různém zdvihu kola, až po finální návrh, viz **obrázek č. 5**, kde již celá kinematika byla v uspokojivém stavu. Takto vypracovaná přední náprava, vlastně stále ještě v syrovém stavu, byla předána kolegovi Tomáši Honzíkovi, který na ní pracoval dál a přivedl ji až do stavu, kdy se dá vyrobit.



Obr. 4 První návrh přední nápravy ve dvou pohledech



**Obr. 5** Finální podoba přední nápravy ve dvou pohledech

Dále bylo potřeba přizpůsobit novým nápravám nosný rám. V další kapitole je popsáno několik řešení již existujících rámových konstrukcí konkurenčních týmů, které jsou na rozdíl od našeho týmu ve vývoji monopostu dál a účastní se již závodů.

### 3.2 Soudobá řešení rámové konstrukce Formule Student

Soudobá řešení nosné konstrukce formulového vozu se dají rozdělit na dvě základní skupiny:

#### a) svařovaný trubkový rám

Jako typického představitele této kategorie můžeme uvést tým Helsinské Polytechniky (viz **obrázek č. 6**), která s touto konstrukcí slaví nemalé úspěchy.



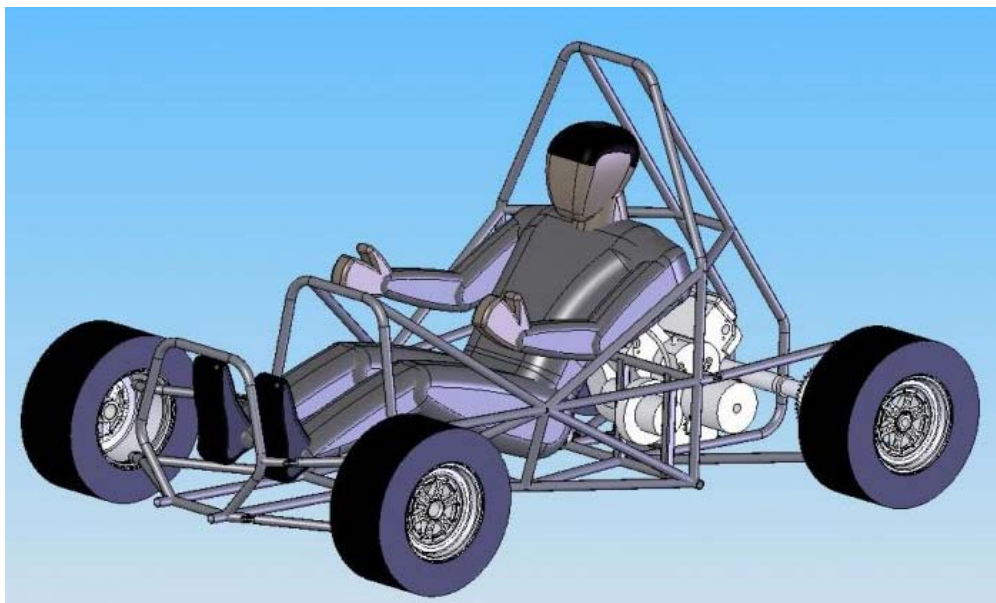
**Obr. 6** Formula student Helsinky Polytechnik [7]

Trubkový prostorový rám je v celé soutěži Formula Student velice rozšířený. Jeho hlavními výhodami jsou jednoduchost, dobrá tuhost, snadná dostupnost použitých trubkových konstrukcí, nenáročná výroba svařováním a z toho plynoucí i nízká cena. Lze u této konstrukce relativně snadno provést analýzu napjatosti v programech MKP. Je to konstrukce



prověřena léty praxe. Dodnes je možné setkat se s celou řadou závodních strojů postavených na trubkovém prostorovém rámu.

V poháru Formule Student je tato konstrukce oblíbená. Konstrukce prostorového trubkového rámu je s úspěchem používána také u jiných soutěžních vozů.



**Obr. 7** UB Motorsport - The State University of New York [8]

Rám UB Motorsport - The State University of New York, viz **obrázek č. 7**, je zajímavý svou jednoduchostí. Pilot je posazen mezi přední a zadní nápravu tak, že pedály, o které se opírá pilot nohama, jsou umístěny do osy předních kol. Takové uspořádání je běžné u ostatních formulových soutěží. V poháru Formula Student je takové uspořádání spíše výjimkou. Na tomto monopostu je takové řešení umožněno použitím malého, vhodně natočeného motoru a vyšší konstrukce rámu.

Jak je vidět na **obrázku č. 8** jsou pilotovy nohy umístěny před přední nápravu. Takové řešení je vhodné pro lepší rozložení hmotnosti, kratší rozvor náprav a pro lepší ovladatelnost při průjezdu zatáčkou.



**Obr. 8** Monopost Universitat Stuttgart [9]

b) skořepinová konstrukce

Typickým představitelem této kategorie monopostů může být Eindhoven. (viz. **obrázek č. 9**)



**Obr. 9 Formula** student univerzity Eindhoven [10]

Využití skořepiny, při návrhu nosné konstrukce celého monopostu, má za následek snížení hmotnosti a zvýšení torzní tuhosti. Takové řešení je na druhou stranu nákladnější a vyžaduje značné zkušenosti konstruktérů, aby bylo dosaženo požadovaného výsledku.

Proto byl návrh vlastní konstrukce koncipován jako prostorový trubkový rám, který bude odpovídat náročným požadavkům stran pravidel soutěže Formula Student týkající se zejména bezpečnosti pilota a dále bude umožňovat uchycení náprav, motoru, sedačky pro pilota, pedálové sestavy a dalších komponent nutných pro provoz monopostu.

## 4 Softwarové prostředky

Při vytváření rámu bylo použito počítačového vybavení. Návrh probíhal v programovém prostředí 2D CADu, ve kterém byly tvořeny první návrhy jak přední nápravy, tak samotného rámu. K tomuto účelu byl využit program Autodesk AutoCAD 2007.

Na vytváření trojrozměrných modelů a kompletaci dílčích celků (přední a zadní náprava, přední a zadní těhlice, motor, sekundární převod, adt.) byl použit program od společnosti PTC Pro-Engineer Wildfire 3.0.

Při návrhu kinematiky přední nápravy byl použit program MSC ADAMS 2005 r2 modul View.

Jako program pro výpočet napjatosti pomocí metodou konečných prvků byl použit ANSYS Release 11.0.

## 5 Požadavky na konstrukci rámu

Jak již bylo napsáno, je zde celá řada omezení, která na konstruktéra číhají při návrhu prostorového rámu studentské formule. V následujících kapitolách jsou popsány ty nejdůležitější z nich.



## 5.1 Bezpečnostní požadavky na konstrukci rámu

Požadavek na zajištění bezpečnosti pilota je nejdůležitějším kritériem, které ovlivňuje návrh prostorového trubkového rámu. Rám musí být navržen tak, aby za každých okolností, jako jsou například čelní nebo boční náraz, převrácení vozu, či jiné nehody, chránil pilota před zraněním. Prostorový trubkový rám vytvoří kolem pilota tzv. bezpečnou zónu.

Charakter jednotlivých zkoušek při samotné soutěži již předchází střetu s pevně stojící překážkou ve vysoké rychlosti, střetu dvou vozidel a mnoha dalším nebezpečným situacím.

### 5.1.1 Materiálové požadavky

V pravidlech [4] vydaných společností SAE jsou přesně stanoveny požadavky na materiál, ze kterého má být rám vyroben.

Základním prvkem pro výrobu prostorového trubkového rámu jsou trubky kruhového průřezu z oceli o min. obsahu C 0,1%. Minimální rozměry trubek jsou definovány v následující tabulce:

<i>Prvek nebo aplikace</i>	<i>Vnější průřez x tloušťka stěny</i>
Hlavní a přední ochranný oblouk	1,0" (25,4mm) x 0,095" (2,4 mm) nebo 25,0 mm x 2,5 (mm) pro metrický systém
Boční ochranná struktura, přední ochranná struktura, výztuhy oblouků	1,0" (25,4mm) x 0,065" (1,65 mm) nebo 25,0 mm x 1,75 mm nebo 25,4 mm x 1,6 mm pro metrický systém
Výztuha přední ochranné struktury	1,0" (25,4mm) x 0,049" (1,25 mm) nebo 25,4 mm x 1,25 mm pro metrický systém

tab. 1 [4]

Pravidla dále umožňují užití alternativních materiálů a rozměrů. Je ovšem potřeba splnit jisté kritéria:

- 1) Materiál musí splňovat ekvivalentní deformační modul EI  
(kde  $E$  je modul průřezu v tahu a  $I$  je kvadratický moment průřezu kolem neslabší osy).
- 2) Minimální tloušťka stěny se řídí tabulkou č. 2.
- 3) Tým musí doložit pevnostním výpočtem, že použitý materiál je strukturně ekvivalentní.

Hlavní oblouk a jeho výztuhy jsou z alternativních materiálů vyňaty. Musí být použita ocel. Pro ostatní části rámu platí následující tabulka.

<b>Aplikace – OCEL</b>	<b>Minimální tloušťky stěn</b>
Přední a hlavní ochranný oblouk	2,1 mm (0,083")
Vyztužení ochranných oblouků, přední ochranná struktura	1,65 mm (0,065")
Boční ochranná struktura, vyztužení přední ochranné struktury	1,25 mm (0,049")

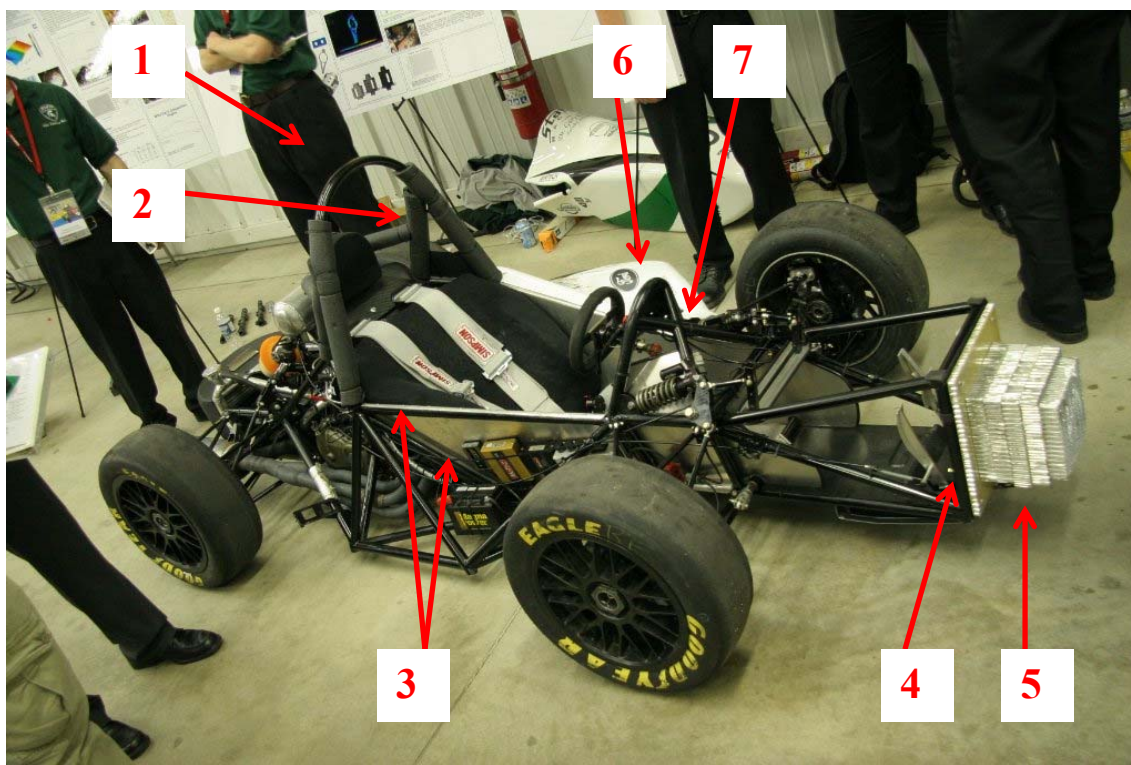
tab. 2 min. tloušťky stěn – OCEL [4]

<b>Aplikace – HLINÍK</b>	<b>Minimální tloušťky stěn</b>
Hliníkové trubky	3,175 mm (0,125")

tab. 3 min. tloušťky stěn – HLINÍK [4]

### 5.1.2 Povinné bezpečnostní prvky

Jsou to prvky, které jsou předepsány pravidly a nesmějí na monopostu chybět.



Obr. 10 [3]

#### Legenda:

- |                                        |                                        |
|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 1) Hlavní ochranný oblouk              | 5) Tlumič nárazu                       |
| 2) Výztuha hlavního ochranného oblouku | 6) Přední ochranný oblouk              |
| 3) Boční ochranný systém               | 7) Výztuha předního ochranného oblouku |
| 4) Přední přepážka                     |                                        |

#### Ochranné oblouky

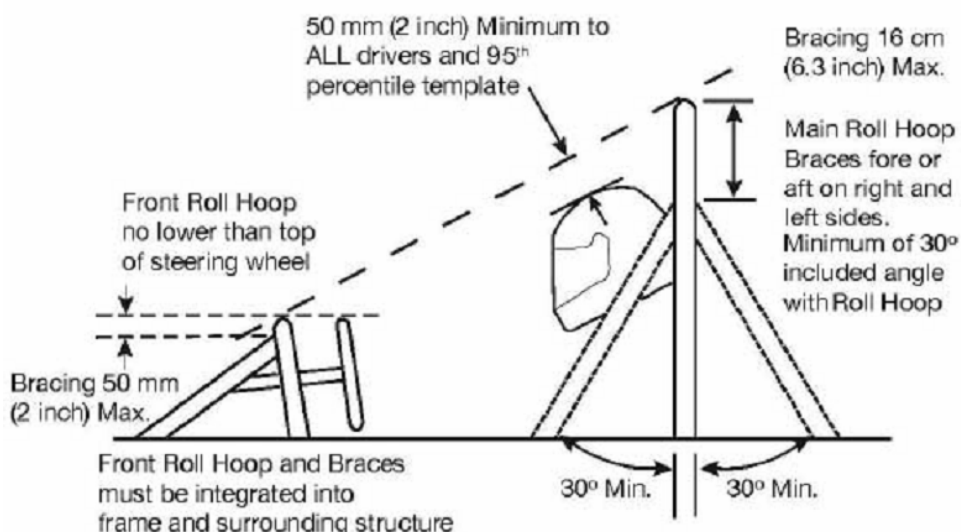
Ochranné oblouky mají sloužit k tomu, aby při převrácení vozidla zabránily kontaktu pilota s vozovkou. Pro případy převrácení vozidla je monopost vybaven předním ochranným obloukem (pozice č.6 na **obrázek č. 10**) a hlavním ochranným obloukem (pozice č.1 na **obrázek č. 10**).

Při normální poloze pilota, připoutaného bezpečnostními pásy, vedeme spojnici mezi vrcholem předního a hlavního ochranného oblouku. Od této spojnice musí být pilotova hlava opatřena přilbou vzdálena minimálně 50,8 mm tedy 2“. Minimální rádius všech zahnutí, na obou obloucích měřený, po střednici musí být minimálně 3krát větší, než je vnější průměr trubky, ze které je oblouk vyroben.

#### Hlavní ochranný oblouk

Tento ochranný prvek je umístěn po bocích nebo těsně za pilotem a je veden z jedné strany monopostu na druhou. Začíná u nejnižšího prvku konstrukce rámu na jedné straně a končí u nejnižšího prvku na straně druhé. Hlavní ochranný oblouk musí být konstruován

z bezešvé trubky kruhového profilu a nesmí být po celé délce přerušen. Jako materiál lze použít pouze ocel. Hliník ani kompozitní materiály pravidla soutěže nedovolují použít.



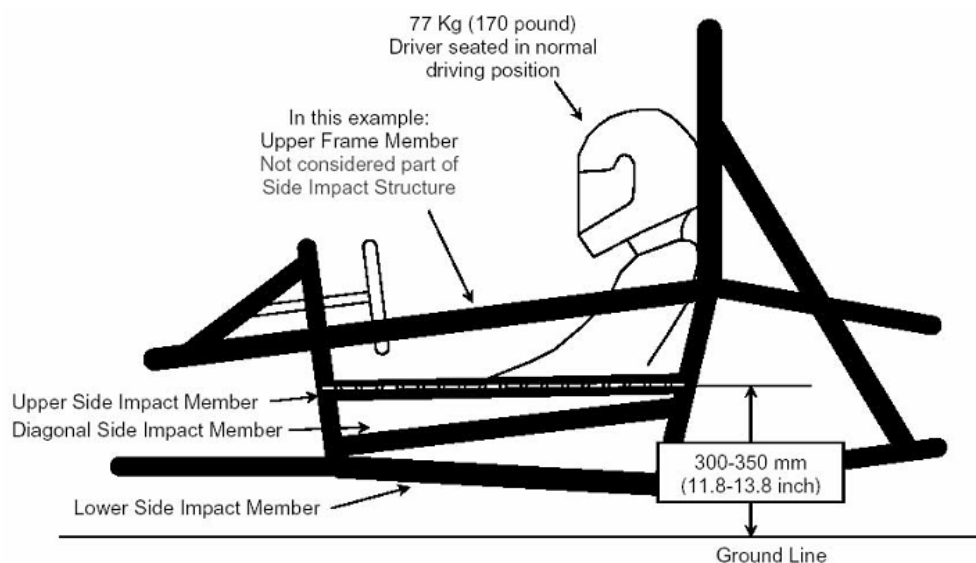
Obr. 11 Umístění ochranných prostředků [4]

Při bočním pohledu na monopost nesmí být žádná část hlavního ochranného oblouku vychýlena od svislé osy víc jak o 10°.

Výztuhy hlavního ochranného oblouku (pozice 2 na obr. 10) musí být také vyrobeny z bezešvých trubek kruhového profilu dle **tabulka č. 1**. Materiál, použitý na výztuhy, je ocel.

### Boční ochranný systém

Jedná se o bezpečnostní prvek, který plní také nosnou funkci. Je spojníkem mezi předním ochranným obloukem a hlavním ochranným obloukem. V jeho blízkosti se nachází trup pilota a proto je kladen velký důraz na pevnost a správnou polohu bočního ochranného systému.



Obr. 12 Boční ochranný systém [4]

Boční ochranný systém se skládá ze tří trubek. Tyto trubky musí být umístěny v pravidlech definovaných mezích. Jak je vidět na **obrázku č. 12**, je to především proto, že v těchto mezích se také pohybuje přední deformační člen a kdyby došlo ke střetu, bude pilot maximálně ochráněn.

Z **obrázku č. 11** vyplývá, že střednice horní trubky (Upper Side Impact Member) ochranného systému je v rozmezí 300 až 350 mm nad vozovkou při plném zatížení vozu. Plným zatížením se rozumí hmotnost pilota (předpokládá se 77 kg) a hmotnost všech náplní.

Dolní trubka systému není nijak výškově omezena. Musí pouze splňovat podmínku, že za žádných jízdních stavů se nesmí dotknout vozovky. Tento požadavek je ovšem kladen všeobecně na celý rám.

Mezi horní a dolní trubkou bočního ochranného systému se nachází diagonální trubka (Diagonal Side Impact Member). Ta je vedena tak, aby při pohledu z boku stoupala směrem k zádi vozu.

## 5.2 Konstrukční požadavky na rám

Dalším hlediskem, které je třeba při návrhu rámu zohlednit, jsou požadavky na rám. Rám je hlavním konstrukčním členem celého monopostu. Je tedy nezbytné, aby měl co možná nejmenší hmotnost a zároveň aby byl dostatečně tuhý. Je také potřeba, aby těžiště monopostu bylo co nejnižší. Na rám je zavěšena celá řada prvků. To znamená, že konstrukce rámu musí umožňovat jejich zástavbu (jedná se především o motor, sekundární převod, palivovou nádrž, pedálovou skupinu a další). Je potřeba, aby rám umožňoval jednotlivé prvky na rám nejen namontovat, ale také aby byl zajištěn snadný přístup k těmto prvkům pro případ opravy.

V neposlední řadě je zde pilot. Tomu musí rám umožňovat nástup a výstup z vozu. Výstup z vozu je další disciplína, která je na soutěži měřena. Výstup je časově limitován, protože pilot musí být schopen v případě nouze rychle opustit kokpit a tím předejít zranění. Rám také omezuje pohyb pilota při řízení. Proto je rám vhodné navrhovat s ohledem na pohodlí pilota tak, aby ho při řízení nic nerušilo.

### 5.2.1 Hmotnost prostorového trubkového rámu

Hmotnost rámu je jedním z hlavních faktorů ovlivňujících chování monopostu na dráze. S rostoucí hmotností celého vozu totiž roste setrvačná síla, kterou musí motor překonávat a tím klesá akcelerační schopnost vozu.



**Obr. 13** Ilustrační foto [3]

Hmotnost rámu ovlivňuje především použitý materiál. Z tohoto důvodu řada týmů volí skořepinovou konstrukci z kompozitního materiálu. Tato volba je ovšem nákladná jak na výrobu, tak na výpočet. V našem případě bude rám z trubkových elementů. Jednotlivé trubkové elementy musejí odpovídat bezpečnostním požadavkům stanoveným pravidly (viz. kapitola 5.1 Bezpečnostní požadavky na rám) podle umístění na rámu. Ostatní trubkové elementy musejí odolávat napjatostem vzniklým provozem monopostu (viz. kapitola 12. Rozbor výsledků).

Rozložení hmotnosti je dalším faktorem, který výrazně ovlivňuje jízdní vlastnosti. Proto je potřeba brát zřetel na umístění jednotlivých prvků jako jsou pilot, motor a podobně. Také rám, jako jeden z prvků, svou konstrukcí může rozložení hmotnosti ovlivnit. Jde především o to, aby nebyla místa, kde se zbytečně a bezúčelně hromadí materiál. V opodstatněných případech, v místech s větší koncentrací napětí, je to ovšem žádoucí.

### 5.2.2 Torzní tuhost

Torzní tuhost rámu je odolnost proti kroucení okolo podélné osy. Je žádoucí, aby rám vykazoval vysokou torzní tuhost. Je to především proto, že značnou měrou ovlivňuje chování monopostu při průjezdu zatáčkou. Při nízké torzní tuhosti zcela mizí účinek zkrutných stabilizátorů na nápravách a není možné ovlivnit chování monopostu (přetáčivost, nedotáčivost).

Návrh prostorového trubkového rámu je vlastně kompromisem mezi hmotností a právě torzní tuhostí. Torzní tuhost celého monopostu není závislá pouze na tuhosti rámu. Významně se na ní podílí i zástavba motoru s převodovkou, jednotlivé části karosérie, které jsou umístěny a připevněny na rám s úmyslem zvýšení torzní tuhosti a další prvky.

Tým	Tuhost (Nm/deg)
Manitoba 2005	6083
Manchester 2005	1907
Manchester 2006	2600
WayneState University 2006	2074
UBR Birmingham 2007	2600

**Tab. 4** Torzní tuhost vybraných týmů

V **tabulce č. 4** jsou uvedeny jenom některé z konkurenčních týmů. Jak je možné si povšimnout u týmu z Manchesteru došlo k vývoji. V roce 2005 měl jejich monopost torzní tuhost o velikosti 1907 Nm/deg. O rok později měl jejich monopost už 2600 Nm/deg. Je tedy vidět nárůst torzní tuhosti. Ta se zvýšila, ale hmotnost celého monopostu se snížila. V roce 2005 vážil 320 kg, zato o rok později vážil pouze 204 kg. Pokles hmotnosti je přičten především dokonalejší konstrukci, která vycházela z předešlého modelu a jistě koncepční změny, které vedly k radikálnímu snížení hmotnosti.

V první generaci návrhu rámové konstrukce pro formulový vůz VUT bylo docíleno torzní tuhosti 1996 Nm/deg respektive 1992,8 Nm/deg při hmotnosti rámu 43 kg. Hmotnost druhého rámu není známa. Další rám, který je k dispozici na srovnání, je trubkový rám Formule Ford. V jejím případě je torzní tuhost 779,2 Nm/deg dle [5]. Tato hodnota není příliš vysoká, přesto pro tento typ soutěžního vozu vyhovující.

Návrh druhé generace rámu studentské formule týmu VUT bude považován za úspěšný, když dosáhne torzní tuhosti vyšší než první generace bez nárůstu hmotnosti.



### 5.2.3 Zástavba jednotlivých komponent

Trubkový prostorový rám musí plnit také funkci nosiče. Musí umožňovat montáž a demontáž všech komponent potřebných pro provoz monopostu. Měl by zajišťovat i přístup k jednotlivým komponentům v případě údržby či seřízení. Všechny komponenty by navíc měly být umístěny v takovém místě, aby bylo nízko položené těžiště, dokonalé vyvážení vozu, tj. momenty setrvačnosti kolem všech os. To vše podporuje dobrou ovladatelnost vozu a zvyšuje jeho konkurenceschopnost.

#### Motor

Podle pravidel soutěže je motor omezen objemem na 600 ccm. Proto byl zvolen motor Yamaha R6 o objemu 599 ccm, **obrázek č. 14**. Motor je v jednom bloku s převodovkou, jak je to u motocyklových pohonných jednotek obvyklé. Motor bude umístěn za zády pilota a před zadní nápravou. Toto uspořádání zajišťuje, že hmotnost motoru se příznivěji rozloží mezi přední a zadní nápravu (ideální poměr 50:50). Motor bude nakloněn směrem dopředu, aby bylo docíleno nižšího položení těžiště a lepší polohy vývodového hřídele z převodovky.

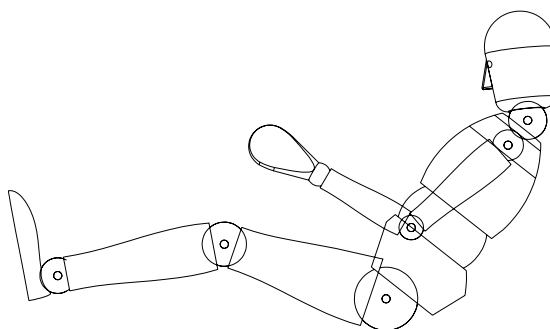


**Obr. 14** Motor Yamaha R6

#### Kokpit pilota

Pilot je jedním z nepostradatelných elementů ve voze. Plní především řídicí funkci. Má ovšem i druhotnou funkci. Jelikož nemůžeme chtít po pilotovi, aby nic nevážil, správná poloha ve voze přispívá k dobrým jízdním vlastnostem monopostu.

Je taktéž zapotřebí přizpůsobit ovládání vozu poloze pilota. Jedná se především o umístění volantu, pedálové skupiny, či řadící páky. Je žádoucí, aby měl pilot při řízení možnost ovládat tyto prvky s určitou dávkou pohodlí. Je vcelku nesmyslné, aby pozice řadící páky byla tak daleko, aby na ni nedosáhl, či tak blízko, že by jej píchala pod žebra.

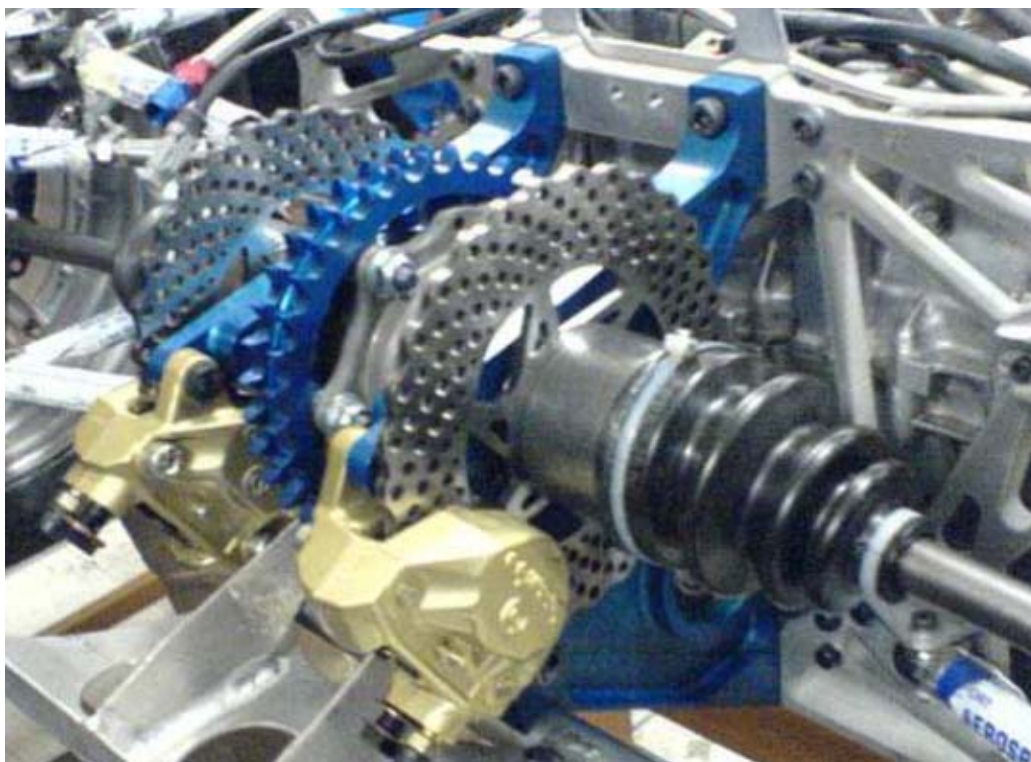


**Obr. 15** Poloha pilota

### Sekundární převod

Jde především o umístění diferenciálu. Sekundární převod je řešen pomocí řetězu. Skládá se z malého ozubeného kola umístěného na vývodovém hřídeli z převodovky a z velkého ozubeného kola, tzv. rozety, umístěné na diferenciálu. U řetězového kola je potřebná funkce napínání řetězu. Napínání lze řešit několika způsoby:

- 1) přidavné řetězové kolo – jednoduché řešení. Výhodou je, že je diferenciál pevně upevněn na rám. **Obrázek č. 16**
- 2) volné uložení diferenciálu – diferenciál je umístěn na otočném čepu a jeho poloha je ustavena stavěcí tyčí. **Obrázek č. 17**



**Obr. 16** Pevné uchycení diferenciálu [3]



**Obr. 17** Volné uložení diferenciálu [3]

#### Uchycení náprav

Uchycení náprav výrazně ovlivňuje geometrii nápravy a tedy i jízdní vlastnosti monopostu. Proto je velmi důležité aby geometrie náprav vznikala současně s konstrukcí rámu. Na rámu jsou uchyceny nejen samotná ramena náprav, ale i pružicí a tlumící prvky. Úchyty těchto prvků lze řešit jako jednoduché (viz. **obrázek č. 18**) nebo polohovatelné.

Přesné nastavení jízdních vlastností monopostu vyžaduje variabilitu uchycení. Variabilita je ovšem náročná na konstrukci a vede k nárůstu hmotnosti. Proto se v praxi volí spíše jednoduché uchycení náprav, které je přesně odladěno a tím je monopost nastaven na určité chování.



**Obr. 18** Uchycení přední nápravy [3]



## Řízení

Mechanismus řízení vlastně převádí rotační pohyb volantu ovládaného pilotem na rotační pohyb kol kolem rejdových os. Celý řídicí mechanismus musí být navržen tak, aby kolo co možná nejlépe kopírovalo trajektorii, po které skutečně jede při zatáčení a nedocházelo tu ke smýkání v důsledku malého nebo velkého natočení kola do zatáčky. Tento poloměr natočení kola kolem rejdové osy je odlišný pro vnitřní a vnější kolo řiditelné nápravy.

Správné nastavení vede k menšímu opotřebení pneumatik, menším ztrátám výkonu v důsledku tření a lepším jízdním vlastnostem.

## Ostatní

Jedná se o umístění dalších komponent důležitých pro provoz monopostu. Jde o palivovou nádrž, sedačku pilota, sací a výfukové potrubí, pedálová skupina, řídicí mechanismus, potřebné elektroniky, měřicích zařízení, brzdového světla a další.

### 5.3 Zatížení rámové konstrukce

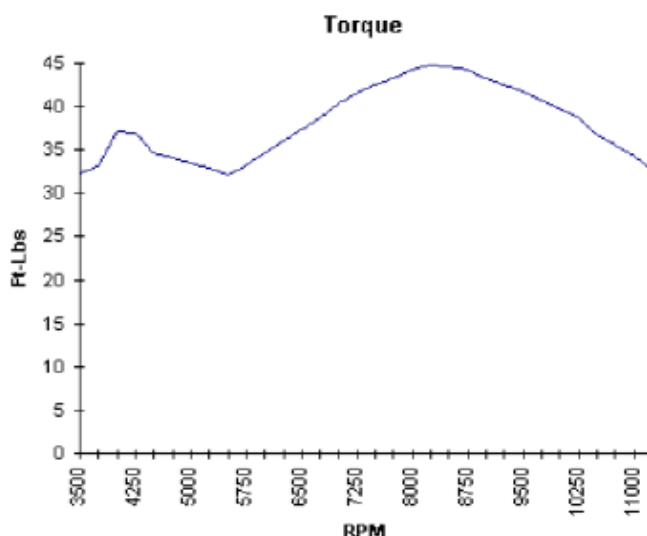
Rámová konstrukce závodního vozu je vystavena různým vlivům. Závodní vůz musí být navržen tak, aby odolával extrémnímu zatížení. Spolehlivost je omezena na minimum. Počítá se každý kilogram hmotnosti, který se ušetří.

#### 5.3.1 Krouticí moment motoru

Aby bylo možné monopost rozjet, je potřeba přenést krouticí moment na kola. Motor vytváří krouticí moment, který se přenáší přes rám na zadní hnanou nápravu. Kdyby motor nebyl pevně uchycen do rámu, docházelo by vlivem kroutícího momentu k jeho natáčení.

Moment je zachycován úchyty na rámu. Tyto úchyty byly navrženy tak, aby motor ustavily do požadované polohy, umožnily jeho zástavbu do rámu a umožnily přenos momentu z motoru na rám.

Průběh momentu je závislý na otáčkách motoru. Z toho vyplývá, že při různých otáčkách bude i různý moment.



**Obr. 19** Průběh Mk v závislosti na otáčkách motoru Yamaha YZF 600 [5]

### 5.3.2 Vibrace motoru

Motor je složen z několika navzájem provázanými rotujícími, či jinak se pohybujícími prvky. Jsou to především ojnice, pístní skupina, klikový hřídel, vačkový hřídel, ventily, a jiné. Rotující části jsou dynamicky i staticky vyvážené, ale i přesto přispívají k celkové vibraci zvláště vibracemi druhého a vyššího řádu. U prvků, které vykonávají translační pohyb nebo sférický pohyb je namáhání způsobené setrvačnými silami.

Motor pro svou hlavní činnost potřebuje, aby zmíněné prvky byly v pohybu. Proto je motor velkým zdrojem vibrací ve voze a je potřeba s tím počítat. Jsou především namáhány úchyty, pomocí kterých je motor upevněn k rámu a při návrhu je potřeba s tím počítat.

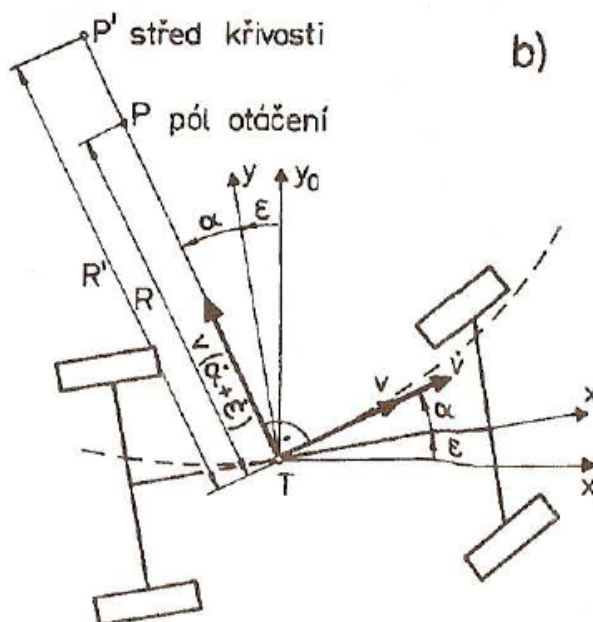
### 5.3.3 Přejíždění nerovností

Zvládnutí přejezdu nerovností je základní funkce celého podvozku monopostu. Je určující pro jízdní vlastnosti. Na druhou stranu se jedná o svislé kmitání a to ve velké míře zatěžuje jak nápravy, tak i samotný rám.

Největším úskalím tohoto kmitání je obtížná předvídatelnost. Jsme schopni určit maximální amplitudu, ale co se průběhu amplitudy týče, je závislá na povrchu, po kterém se monopost pohybuje.

### 5.3.4 Průjezd zatáčkou

Průjezd zatáčkou zatěžuje konstrukci prostorového trubkového rámu především od působení dostředivých sil. Jejich eliminace vede k jízdě po přímé dráze, což není žádoucí. Proto je potřeba s tímto zatížením počítat při konstrukci rámu.



Obr. 20 Jízda zatáčkou [5]

### 5.3.5 Akcelerace, decelerace

Decelerace, nebo-li brzdění, nejen zpomalí vozidlo, ale díky účinkům setrvačných sil dojde k přenesení váhy na přední nápravu. Prostřednictvím ramen náprav a odpružení je zatížení přenášeno na konstrukci rámu.

## 6 Soudobá řešení trubkových rámu

Na začátku tvorby rámu nebylo příliš zkušeností, proto je dobré nahlédnout do kuchyně ostatním týmům, kteří se účastní stejné soutěže. K tomuto činu napomáhá také to, že v pravidlech [4] je povinnost jednotlivých týmů zveřejňovat své monoposty a data k nim na internetu.

### Přední část rámu

Přední část rámu v sobě ukrývá nohy pilota, pedálovou skupinu, mechanismus řízení, přední deformační člen, uchycení přední nápravy a jejího odpružení. Na **obrázku č. 21** je jedno z možných řešení. Toto řešení je docela časté s drobnými modifikacemi u mnoha týmů. V našem případě bude vycházeno z modelu přední nápravy, která má odlišnou konstrukci. Proto se tato konstrukce neuplatní.



**Obr. 21** Konstrukce přední části [9]

### Střední část rámu

Střední část rámu ukrývá především pilota. Je zde kladen velký důraz na bezpečí a ochranu zdraví pilota. Setkáváme se zde především s bezpečnostními prvky. Jedná se o přední a hlavní ochranný oblouk. Mezi nimi je boční ochranná struktura. Za zády pilota musí být přepážka oddělující prostor pro pilota od prostoru pro motoru.

Na **obrázku č. 22** je možno vidět zmiňované prvky. Pro zvýšení zvláště pohodlí pilota jsou ve vhodných místech umístěny měkké obklady z nehořlavých materiálů. Jde především o předejití styku částí těla pilota s pevnými a tvrdými částmi rámu.

Dále se ve střední části může nacházet chladič chladicího systému hnacího agregátu. Některé týmy řeší umístění chladiče na konstrukci nad motor. Výhodou může být tzv. doutníkový vzhled monopostu, který byl obvyklý u monopostu z počátku formulové éry a v krátkém potrubí pro vedení chladicí kapaliny. To může snížit množství chladicí kapaliny a tedy i hmotnost monopostu. Nevýhodou je umístění velké hmotnosti poměrně vysoko nad vozovkou. Dojde ke zvýšení polohy těžiště monopostu a tedy i k zhoršení jízdních vlastností.



Obr. 22 Boční pohled na monopost [9]

#### Zadní část rámu

V zadní části rámová konce ukrývá hnací agregát s převodovým ústrojím, diferenciál s centrální brzdou pro obě zadní kola a v neposlední řadě úchyty zadní nápravy, jak je vidět na **obrázku č. 22**. Je zde koncentrována podstatná část hmotnosti celého monopostu. Proto se řada týmů snaží umístit pilota hodně dopředu tak, aby motor mohl být umístěn uprostřed monopostu. Takové uspořádání vede k ideálnímu rozložení hmotnosti 50:50.

## 7 Zatížení rámu

Tvorba modelu rámové konstrukce by nebyla úplná, kdybychom namodelovaný rám nepodrobili zátěžové zkoušce. Bylo by dobré najít takové zatížení, které by odpovídalo jízdním stavům. To v počátcích návrhu celého monopostu není snadné a proto vzniklo smluvní zatížení, které prověří rám a je porovnatelné pro s ostatními rámy.

### 7.1 Zatížení krutem

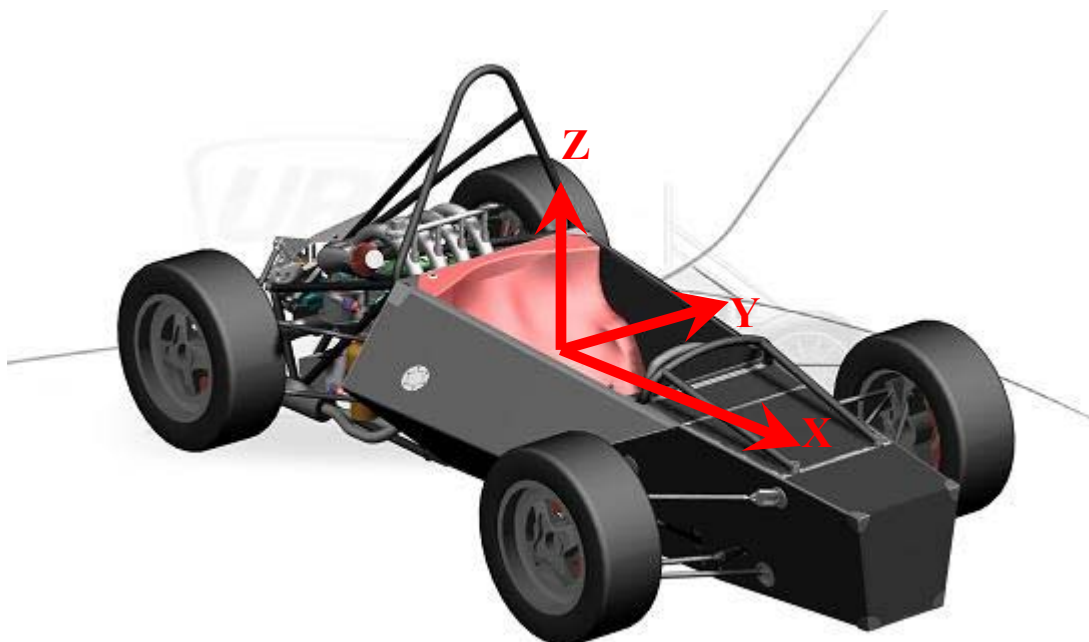
Bylo zjištěno, že zatížení krutem je jedním z hlavních zatížení, které na rám působí při jízdě monopostu. Je to způsobeno především tím, že monopost je nucen přejíždět nerovnosti různými koly. Nejdříve přejede nerovnost jedno kolo a pak další. To vede ke zkroucení rámu. Byl stanoven způsob zatěžování, který je porovnatelný.

Tedy konkrétně. Jedno kolo, pravé zadní po směru jízdy, bude pevně uchyceno. Budou zamezeny pohyby ve všech třech osách (x,y,z). Levému zadnímu kolu bude zamezen posun v ose z. Pravé přední kolo bude omezeno v pohybu v osách y a z. Levé přední kolo bude zatěžováno silou 1000 N v kladném směru osy z.

Orientace jednotlivých os je následující. Osa x je totožná s podélnou osou monopostu a je kladná ve směru jízdy, osa y je kolmá na osu x a její kladná hodnota směřuje od podélné



osy doprava po směru jízdy. Osa z je kolmá na osu x a y. Její kladný směr je směrem vzhůru od spodní části rámu. Jak je vidět na **obrázku č. 23**.



**Obr. 23** Zvolený souřadný systém [10]

## 7.2 Zatížení ohybem

Na ohyb je rámová konstrukce namáhána díky váze jednotlivých částí a při různých jízdních stavech. V době návrhu rámové konstrukce ještě nebyly známy silové účinky při jednotlivých jízdních stavech, proto bylo třeba najít ekvivalentní zatížení.

Vycházelo se z předpokladu, že monopost bude mít celkovou hmotnost okolo 320 kg i s pilotem a všemi náplněmi. Vzhledem k tomu, že kola a nápravy rámovou konstrukci na ohyb nezatěžují, bylo stanoveno celkové zatížení na ohyb na hodnotu 3000 N, tedy ekvivalent 300 kg hmotnosti. Působíště zatížení bylo zvoleno v místě předpokládaného těžiště monopostu.

## 8 Postup konstrukce rámu

Vytváření druhé generace prostorového trubkového rámu studentské formule týmu VUT vycházelo ze zkušeností a poznatků tvůrců první generace. V první generaci vznikly dva návrhy rámové konstrukce.

### 8.1 Rámové konstrukce 1. generace

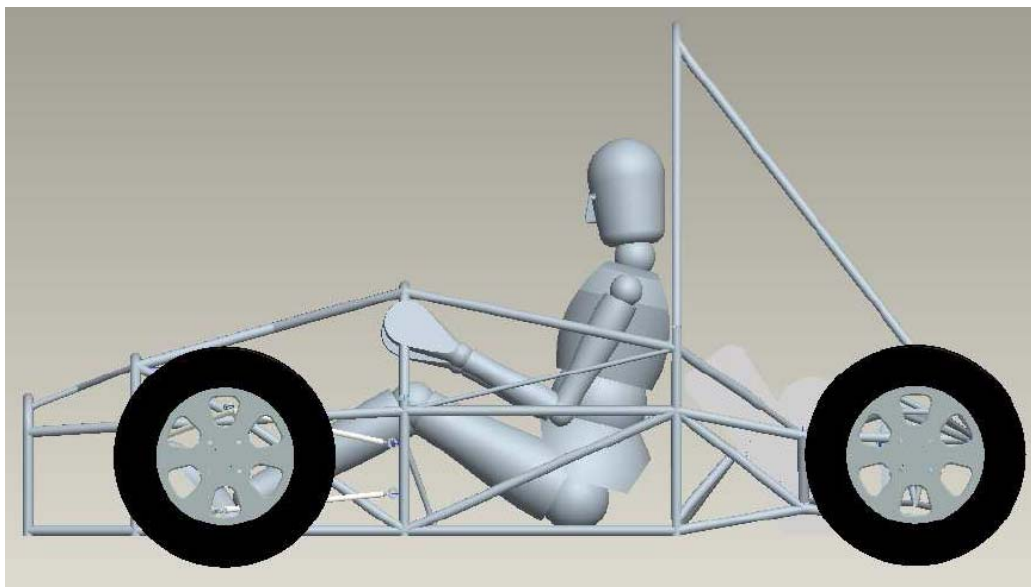
Na tvorbě rámové konstrukce 1. generace se podíleli Petr Hajdušek a Jiří Kolavík. Dnes již oba absolventi VUT v Brně.

#### Hajduškův rám

Návrh Petra Hajduška byl ovlivněn prostorovým trubkovým rámem Formule Ford, která je na Ústavu Automobilového a Dopravního Inženýrství (ÚADI) k dispozici

(viz **obrázek č. 25**). Přední část rámu až po hlavní ochranný oblouk je dostatečně tuhá a lehká. Zadní část je ovšem složitá a zástavba jednotlivých komponent by byla obtížná.

Také poloha pilota je zde hodně vzpřímená, viz. **obrázek č. 24**. To vede k většímu aerodynamickému odporu, vyšší poloze těžiště a tedy ke zhoršení jízdních vlastností monopostu.

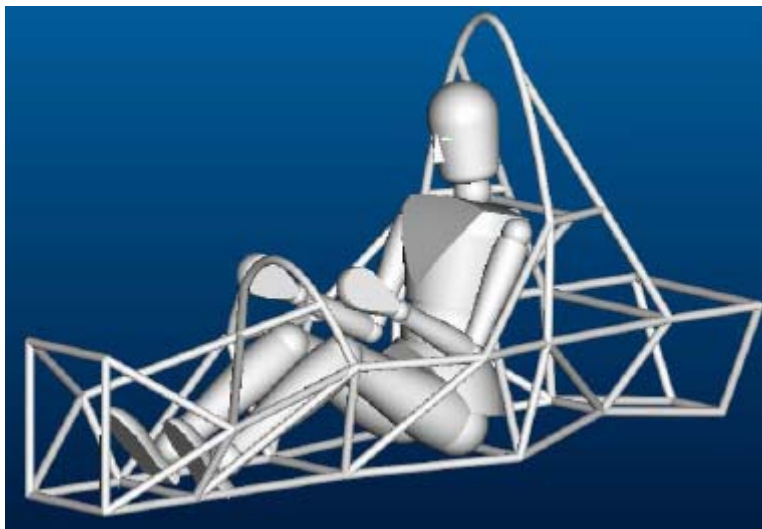


**Obr. 24** Rámová konstrukce 1. generace [5]



**Obr. 25** Formule Ford 1600 [5]

### Kolavíkův rám



**Obr. 26** Rámová konstrukce 1. generace [6]

Už na první pohled je patrná nízká konstrukce bočnic (**Obrázek č. 26**). To vede ke snížení hmotnosti v horní části rámu. Na druhou stranu to klade velké nároky na zbylé prvky trubkové konstrukce, aby odolaly všem druhům zatěžování.

Také je zde poloha pilota velice vzpřímená. Tento nedostatek je v 2. generaci rámové konstrukce odstraněn.

Velice zajímavě je řešena část rámu za zády pilota. Hlavní ochranný oblouk je zde posunut více do předu. Dostává se tedy do prostoru vedle ramen pilota. Toto opatření vede k větší ochraně pilota. Na druhou stranu je částečně omezen prostor pro motor.

## **8.2 Vývojové stupně 2. generace prostorového trubkového rámu**

Vývoj druhé generace prostorového trubkového rámu studentské formule pro náš tým vznikl ruku v ruce s vývojem nových náprav. Především v přední části monopostu byl vývoj rámu podřízen nápravám. Zadní část rámu byla řešena až po ustálení podoby zadní nápravy, na které dělal kolega Tomášek a vývoj je námětem samostatné diplomové práce.

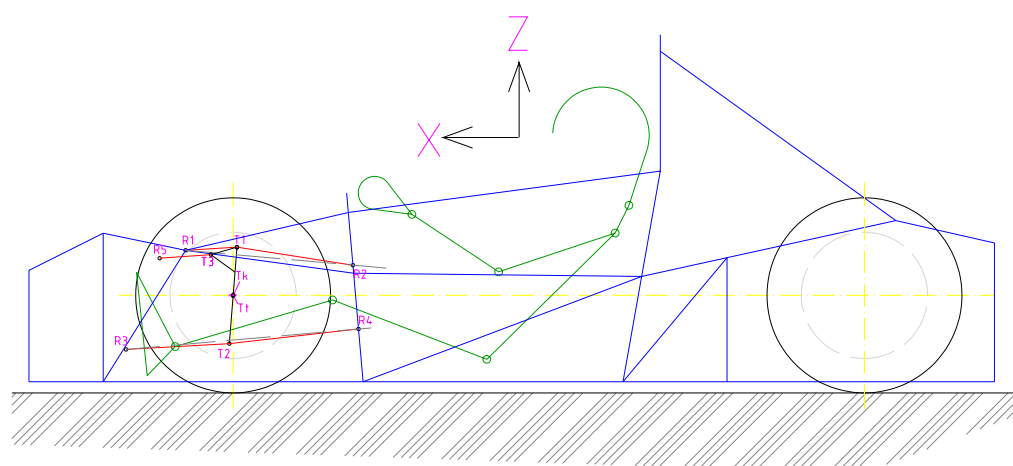
Před započítím samotných prací bylo stanoveno pár základních faktů, které musí rám splňovat. Kromě zástavby jednotlivých prvků bylo stanoveno:

Rozvor náprav	1700 mm
Rozchod kol	1250 mm
Minimální světlá výška monopostu	30 mm
Vnější průměr pneumatik	520 mm

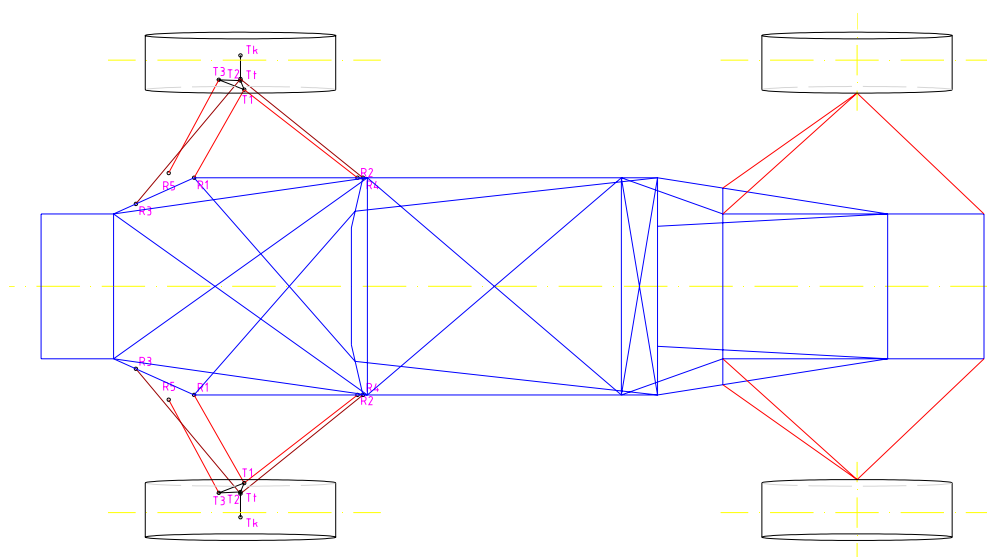
### Vývojový stupeň č.1

První vývojový stupeň rámové konstrukce byl ovlivněn geometrií přední a zadní nápravy. Na **obrázcích č. 27 a č. 28** jsou náčrty prvního návrhu rámu druhé generace.

Jak je vidět, poloha pilota již není tak vzpřímená jak tomu bylo u první generace. V této etapě vývoje ještě nebyla přesně známá poloha motoru ani dalších komponent, proto je rám vyobrazen pouze jako model střednic reprezentujících trubek.



**Obr. 27** Vývojový stupeň č.1 – pohled z boku

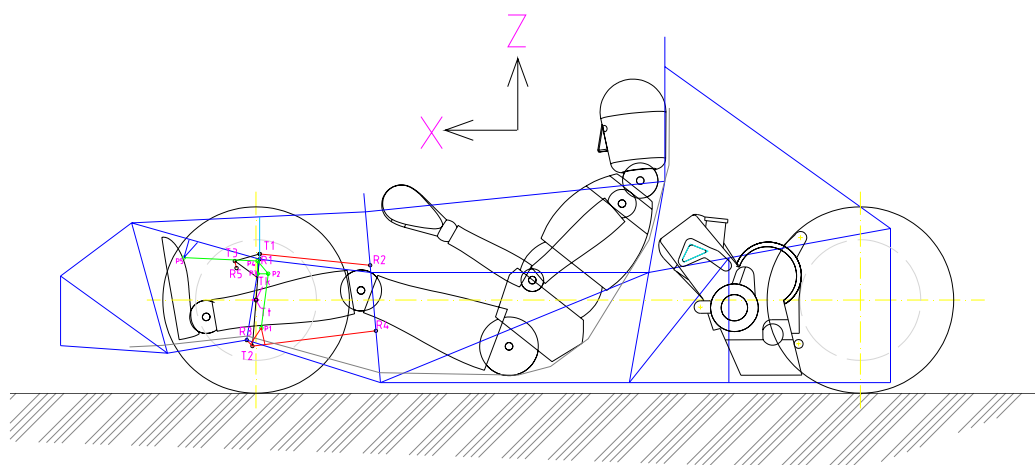


**Obr. 28** Vývojový stupeň č.1 – pohled zhora

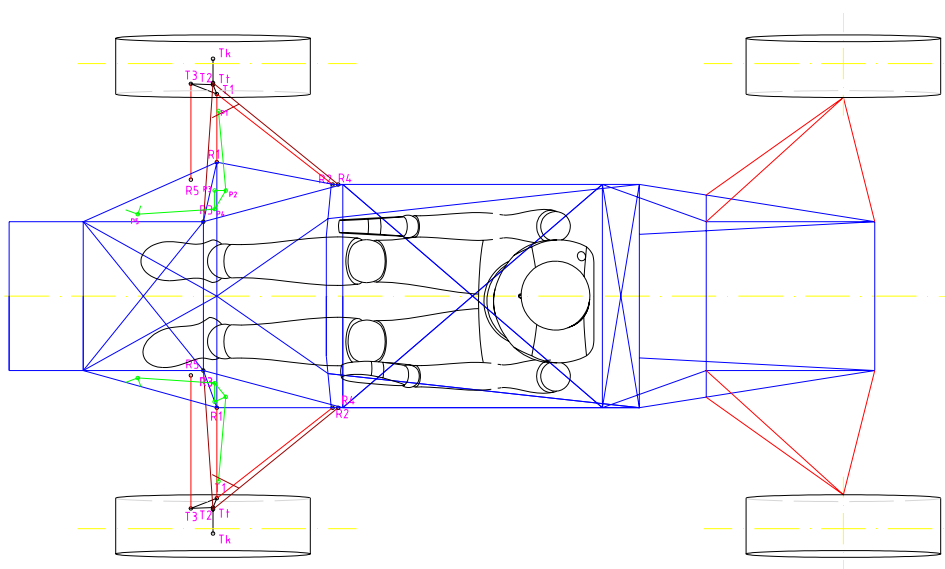
### Vývojový stupeň č.2

Druhý vývojový stupeň byl opět ovlivněn změnou geometrie přední, potažmo zadní nápravy. V důsledku toho je možno si povšimnout určité změny přední části. Nohy pilota jsou ve vyšší poloze a spodní rameno přední nápravy zasahuje až k nohám pilota. Tímto opatřením se docílilo toho, že obě ramena náprav mají přibližný tvar pravoúhlého trojúhelníku. Tato změna měla pozitivní vliv na průběh sbíhavosti přední nápravy a tedy i na jízdní vlastnosti.





Obr. 29 Vývojový stupeň č.2 – pohled z boku



Obr. 30 Vývojový stupeň č.2 – pohled z hora

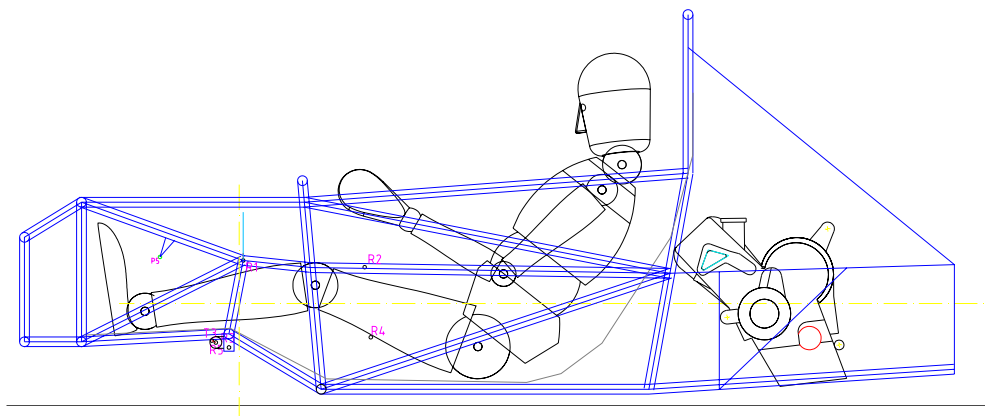
V této etapě návrhu je již počítáno s předním odpružením (na **obrázku č. 29** a **č. 30** vyznačeno zelenou barvou) a se zástavbou motoru. Zadní nápravy byly také pozměněny.

Byl ovšem zachován rozvor náprav a rozchod kol. Tato hodnota je stejná pro všechny stupně vývoje.

### Vývojový stupeň č.3

Dále byla testována varianta, kdy by převodka řízení byla umístěna v podlaze monopostu, tedy pod nohama pilota. Přineslo by to mírné snížení těžiště na druhou stranu. Takové řešení znamená, že by pilot měl mezi nohama hřídel přenášející otáčky volantu na převodku řízení (**obrázek č. 31**).

Toto řešení se poměrně často vyskytuje u konkurenčních týmů. Po podrobném zkoumání vlivů tohoto řešení na geometrii přední nápravy a na pohodlí pilota při nastupování a vystupování z monopostu bylo od takového řešení upuštěno.

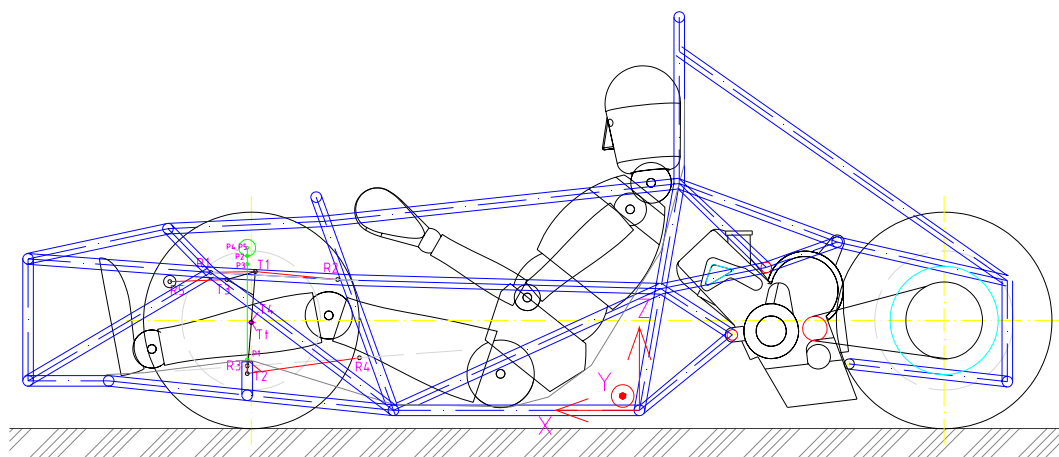


**Obr. 31** Vývojový stupeň č.3 - pohled z boku

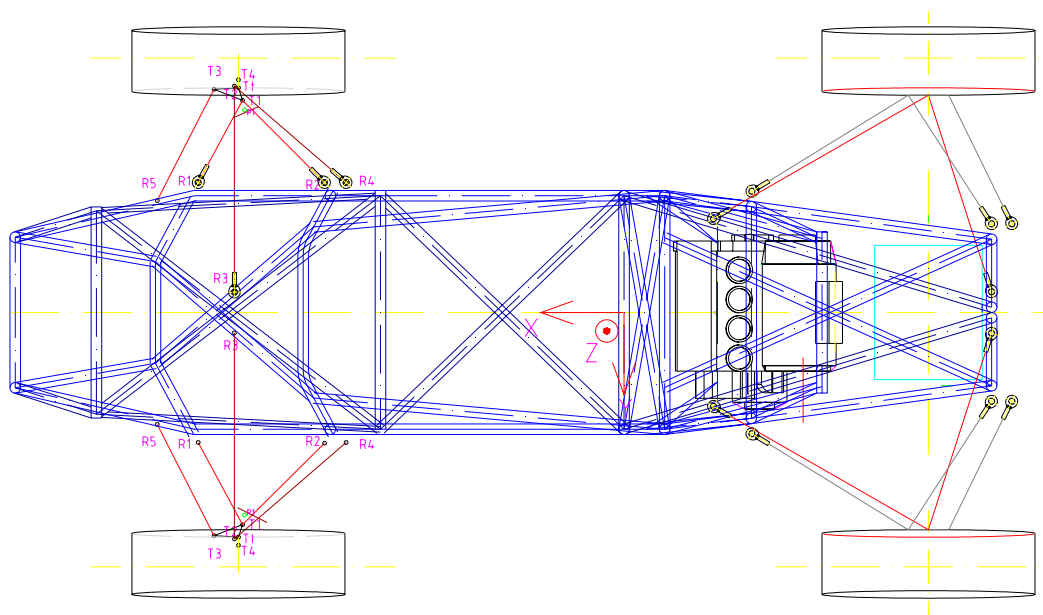
Dále bylo zkoumáno, zda přemístění převodky řízení do pozice nad nohama pilota bude příznivější. Na geometrii přední nápravy to mělo pozitivní vliv. Nicméně to bylo na úkor pilota, který by se jenom stěží mohl do monopostu nastoupit a dosáhnout na pedály. Od této varianty bylo taktéž upuštěno.

#### Vývojový stupeň č.4

V této chvíli již byla známa finální geometrie přední nápravy. Bylo přesně známo, kde na rámu budou úchyty. Převodka řízení zůstala nad nohama pilota a tedy mu nebude bránit při vystupování z kokpitu monopostu.



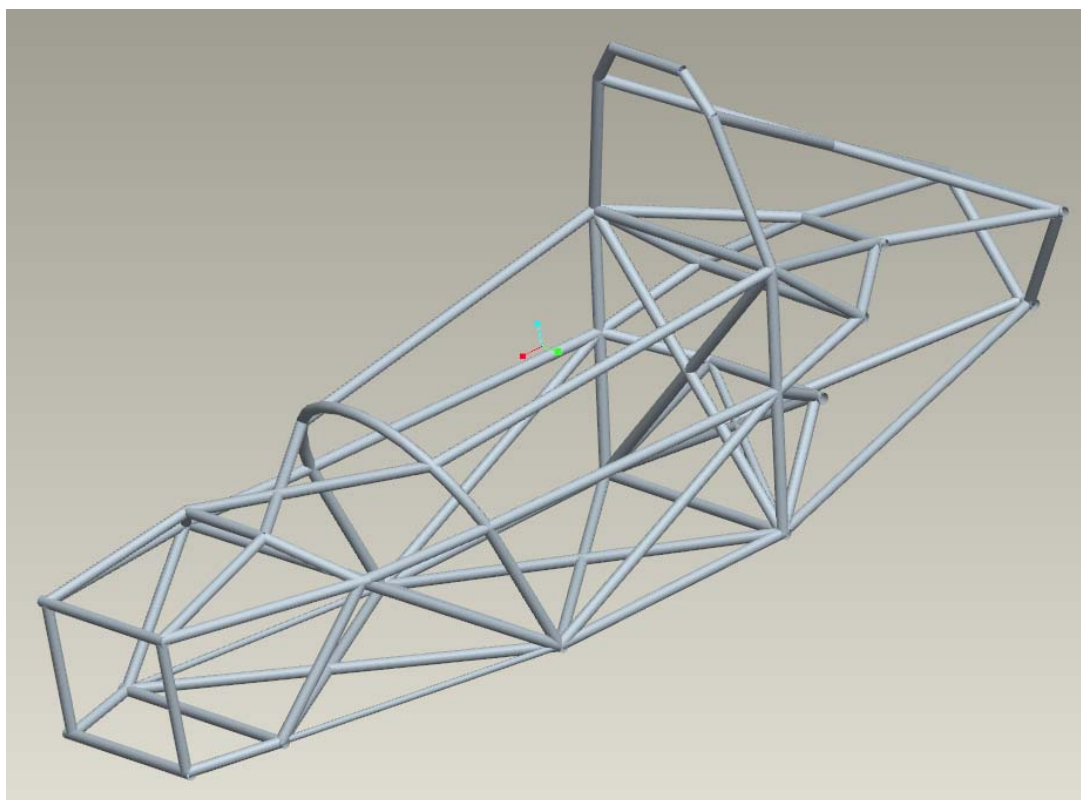
**Obr. 32** Vývojový stupeň č.4 - pohled z boku



**Obr. 33** Vývojový stupeň č.4 - pohled z hora

V této fázi vývoje je již známa poloha pilota. Motor byl pootočen tak, aby řetězový převod mezi převodovkou a diferenciálem byl pokud možno ideální. Tedy, aby opásání pastorku i rozety řetězem bylo co největší.

Bylo možno přikročit k tvorbě prostorového modelu. Byl využit 3D CAD ProEngineer WildFire 3.0.



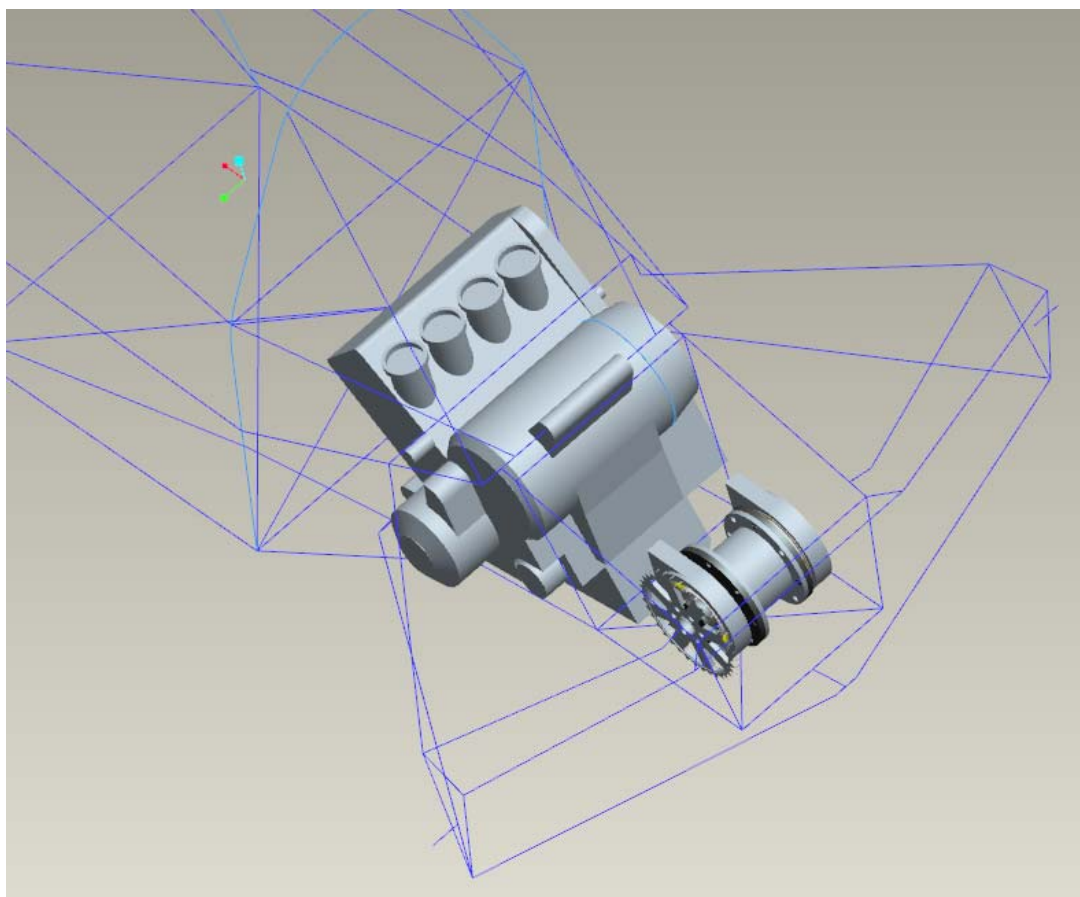
**Obr. 34** Vývojový stupeň č.4 - prostorový model rámu

Jak je patrné z **obrázku č. 34**, tedy z prostorového rámu, jedná se o konstrukci silně předimenzovanou a tedy zbytečně těžkou.

#### Vývojový stupeň č.5

Přední část rámu byla už téměř vyřešena. Zbývalo vyřešit zadní část rámu. Na tom bylo pracováno s kolegou Tomáškem. Řešení muselo odpovídat jak potřebám zástavby jednotlivých komponent v zadní části monopostu, jako jsou motor, diferenciál, brzdový systém, tak požadavkům ze strany geometrie zadní nápravy.

Mezikrokem k finálnímu řešení byla varianta znázorněna na **obrázku č. 35**. Je zde znázorněno v drátěném modelu jedno z možných řešení. Konkrétní provedení držáků jednotlivých ramen ještě nebylo stanoveno a tak drátěný model postačil k vizualizaci návrhu.



**Obr. 35** Vývojový stupeň č.5 - zadní část rámové konstrukce

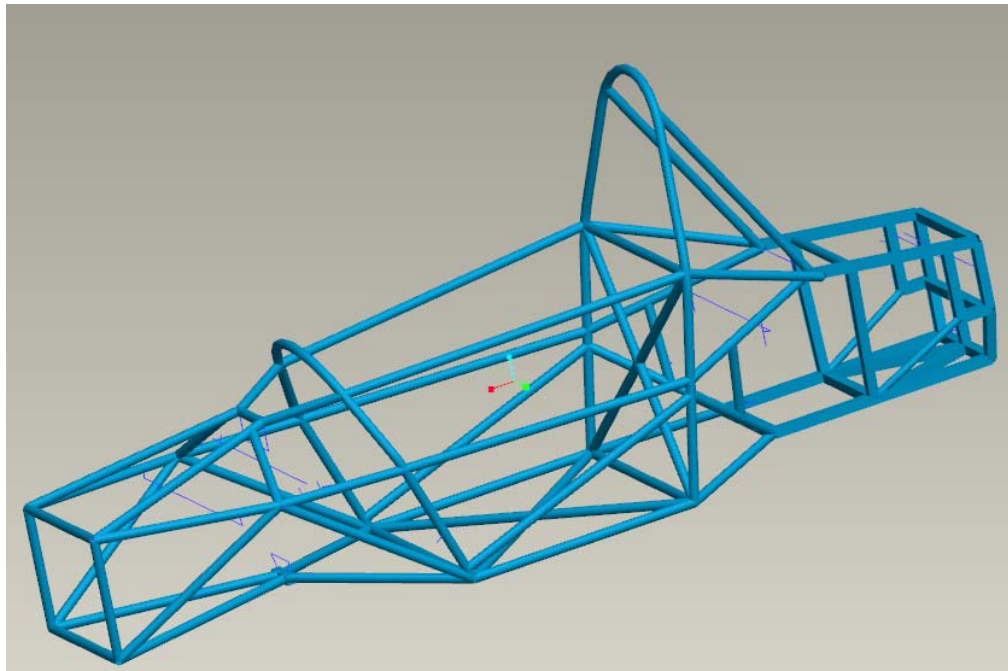
## **9 Finální podoba rámu před výpočtovou analýzou**

K finální podobě rámové konstrukce se dospělo po konzultacích s kolegy pracujícími na obou nápravách a na alternativním výpočtu rámové konstrukce, který se zabývá i jednotlivými svary mezi trubkami rámu.

Tato podoba rámu, jak je možno vidět na **obrázku č. 36**, odpovídala požadavkům na uchycení náprav i jiných důležitých prvků monopostu. Došlo ke změně hlavního ochranného oblouku, který již není zalomený při pohledu z boku monopostu. Tato změna byla provedena s ohledem na výrobu oblouku ohýbáním.

Proto bylo přikročeno k tvorbě podrobného modelu pro výpočet v programu MKP (Metoda Konečných Prvků). Postup výpočtových prací je popsán v samostatné kapitole.

Zde je vývoj rámu téměř u konce. Zůstává doladit jednotlivé profily použité v určitých místech rámu na základě výpočtu v MKP.



Obr. 36 Finální podoba rámu

## 9.1 Použitý materiál, profily

Při tvorbě finálního návrhu byly použity následující profily a materiály.

Materiál, zvolený pro jednotlivé prvky konstrukce, je použita ocel 15 230, která má minimální mez kluzu na hodnotě 835 MPa, což zaručuje možnost použití tenkých profilů a tedy snížení hmotnosti rámu.

První výpočet rámu nám ukáže správnost navržené konstrukce. Byly použity následující profily:

- Tr  $\varnothing 25 \times 2,5$  mm – hlavní a přední ochranný oblouk
- Tr  $\varnothing 25 \times 1,75$  mm – boční ochranná struktura, všechny vysoce namáhané prvky
- Tr  $\varnothing 25 \times 1$  mm – ostatní méně namáhané části
- Tr  $\varnothing 15 \times 1$  mm – náhrada modelu ramen náprav (zvýšen E průřezu materiálu)
- Tr 4HR 20  $\times$  1 mm – zadní část rámu za motorem

Materiál a profily byly voleny s ohledem na bezpečnostní požadavky pravidel soutěže. Menší počet profilů také snižuje náklady na výrobu a dodávky potřebných dílů.

## 9.2 Těžiště a hmotnost rámové konstrukce

Hmotnost takto navrženého rámu se pohybuje na hodnotě 28 kg. Oproti ráům první generace je hmotnost o třetinu nižší. Zda-li nemělo takto velké snížení hmotnosti velký vliv na hodnotu torzní tuhosti, ukáže až výpočet torzní tuhosti provedený v kapitole 10.3.

Těžiště rámu má následující souřadnice:

Osy	2. generace	1. generace [5]
x	203,35 mm	394 mm
y	$0,68 \times 10^{-12}$ mm	-0,98 mm
z	267,71 mm	275,5 mm

tab. 5 Poloha těžiště

Poloha těžiště první generace rámu podle Hajduška [5] byla přepočítána vzhledem k souřadnému systému druhé generace rámové konstrukce. Z porovnání hodnot vyplývá snížení těžiště v z-ové ose. Hodnota v ose y se limitně blíží k nule. Z toho vyplývá že je rám téměř dokonale vyvážen. Poloha těžiště vzhledem k zvolenému souřadnému systému v ose x, tedy podélné osy vozu, vykazuje posun k zádi vozu. Rám má lehčí přední část.

## 10 Analýza napjatosti

Analýza napjatosti bude probíhat v programu Ansys 11.0, který pro výpočet využívá metodu konečných prvků.

Do programu Ansys byl model prostorového trubkového rámu přenesen pomocí souborového formátu IGES, který je univerzální pro prostorové CAD systémy.

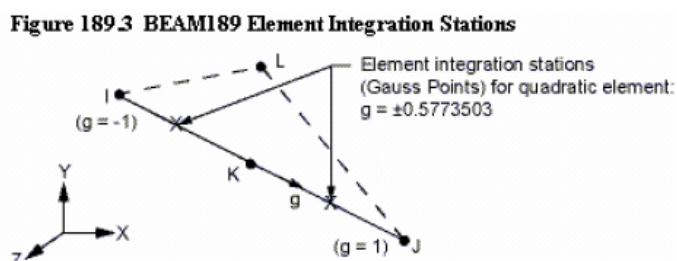
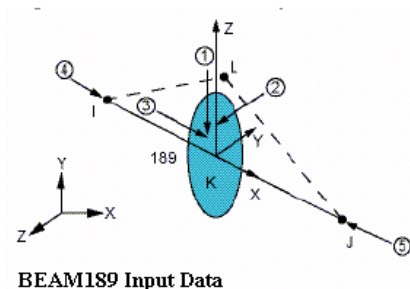
Ve výpočtovém programu Ansys bylo potřeba nadefinovat prvky se kterými program bude rám počítat:

Model rámové konstrukce byl zatěžován pouze staticky. Aby bylo možné provést výpočet v Ansysu metodou MKP je třeba nadefinovat následující materiálové vlastnosti.

### Aplikované prvky:

**Beam 189** (3-D Quadratic Finite Strain Beam) – tento prvek je vhodný pro řešení konstrukcí složených ze štíhlých trubek různých profilů. Využívá Timošenkovu teorii trubkových profilů. Jedná se o kvadratický prvek s třemi uzly I, J a K. Na každém uzlu je 6 - 7 stupňů volnosti, podle zadaných klíčových vlastností. Stupně volnosti pro tento prvek jsou  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$ ,  $rot_x$ ,  $rot_y$ ,  $rot_z$ . Na koncích střednice se chová jako vetknutý prut, což dokonale simuluje svar.

Pro své vlastnosti je tento prvek ideální pro řešení trubkových konstrukcí, proto byl použit pro vytvoření sítě na všech trubkových částech rámu.



Obr. 37 Beam 189 [11]

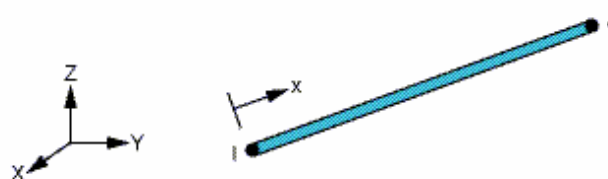


Materiálové vlastnosti prvku beam 189:

- Materiál se chová jako strukturní, lineární, elastický, isotropický
- $E_x = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$
- $\mu = 0,3$
- Velikost a tvar příčného průřezu dle rozměrů daných trubkových profilů.

**Link 8** (3-D Spar) – jedná se o tyčový prvek, který může být použit při modelaci podpěr, prohnutých kabelů, ocelových vedení, pružin a v jiných podobných aplikacích. Na svých koncích je osazen sférickou vazbou, nepřenáší žádný ohyb.

Prvek se ideálně hodí pro modelování zavěšení náprav a mechanismus odpružení.



Obr. 38 Link 8 [11]

Materiálové vlastnosti prvků Link8:

- Materiál se chová jako strukturní, lineární, elastický, isotropický
- $E_x = 2,1 \cdot 10^8 \text{ MPa}$
- $\mu = 0,3$
- Příčný průřez  $S = 250 \text{ mm}^2$
- Počáteční napětí v materiálu  $INS = 0 \text{ MPa}$

Podrobný popis tvorby síťovaného modelu lze najít v diplomových pracích Ing. Petra Hajduška [5] a Ing. Jiřího Kolavíka [6]

## 10.1 Zatížení krutem

Aby bylo možné určit, zda je rám schopen pohlcovat zatížení, která vznikají při provozu, bylo potřeba model rámu zatížit. Jedním z velkých zatížení na rámovou konstrukci je zatížení krutem, které vzniká tehdy, když je jedno kolo výš než ostatní.

Tento model byl převzat a použit pro zjištění torzní tuhosti, což je porovnatelný ukazatel pro různé prostorové rámy závodních automobilů a monopostů, jak již bylo napsáno dříve.

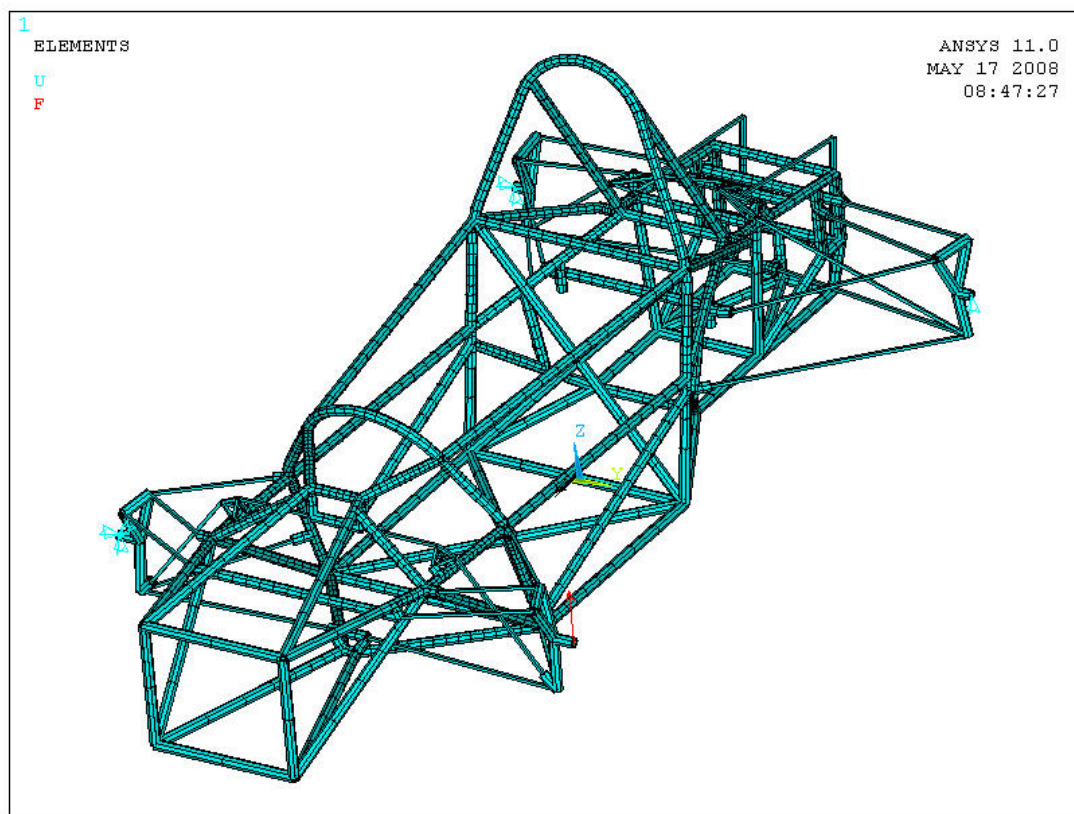
### Zatížení a uchycení monopostu

	uz	ux	uy	Fz [N]
<b>Levé přední kolo</b>	-	-	-	1000
<b>Pravé přední kolo</b>	X	X	X	-
<b>Levé zadní kolo</b>	X	-	-	-
<b>Pravé zadní kolo</b>	X	X	-	-

tab. 6 Okrajové podmínky výpočtu

Pro výpočet je potřeba vytvořený prostorový model opatřit sítí jednotlivých prvků. Na vysítování byly použity prvky Beam 189 a Link 8. Vysítovaný model je možno vidět na **obrázku č. 39**.

Po vysítování je potřeba model upevnit a zatížit. Upevnění a zatížení bylo provedeno podle **tabulky č. 5**. „X“ označuje posuny v jednotlivých osách, které byly zamezeny. Posuvy byly zamezeny v náboji těhlice, tedy na konci náhrady. Je ovšem potřeba, aby se rám mohl smršťovat a roztahovat a zároveň aby tzv. v prostoru neutekl. To by mohlo výpočet zkreslit, popřípadě znemožnit.



**Obr. 39** Vysítovaný model v Ansysu

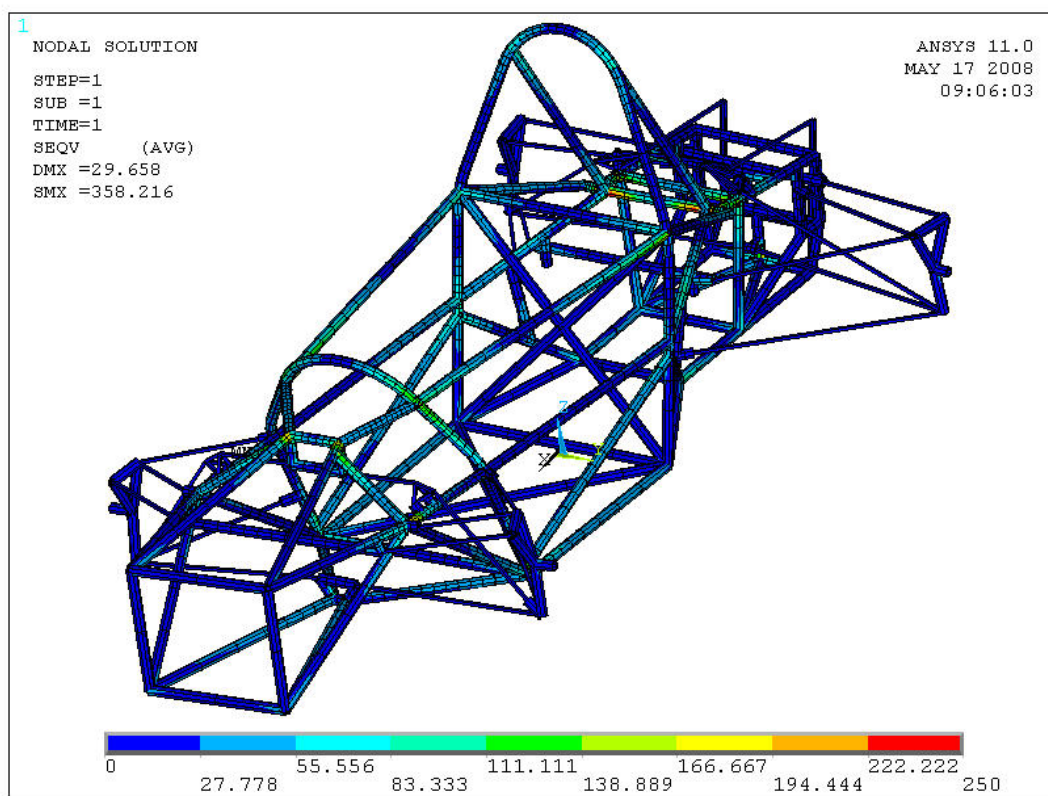
Když byl proveden výpočet na navrhovaném rámu, bylo patrné, že na mnoha místech je rám silně předimenzován. Viz **obrázek č. 40**. Všechny modré plochy znamenají minimální zatížení. Největší koncentrace napětí je ovšem v zadní části, v místě, kde bude uchycen motor a kde se stýkají přední a horní zadní část rámu. Koncentrace napětí v tomto místě byla předvídaná a její hodnota je poměrně vysoká.

Než ale bylo přikročeno ke změně profilů u málo nebo vysoce namáhaných prvků konstrukce, bylo třeba provést další zátěžové testy.

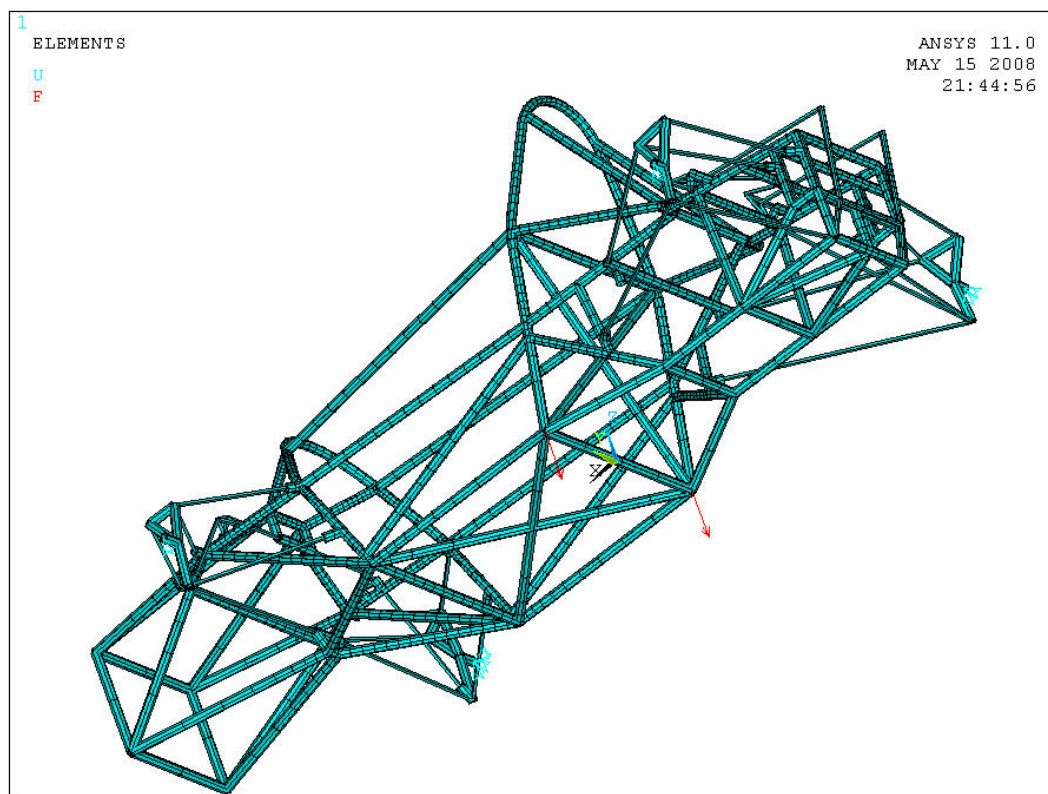
## 10.2 Zatížení ohybem

K tomuto druhu zatížení dochází vždy. Jeho iniciátorem je hmotnost všech komponent navěšených na rám a hmotnost samotného rámu. Na této zátěži se podílí i samotný pilot.





Obr. 40 Rám po provedeném výpočtu

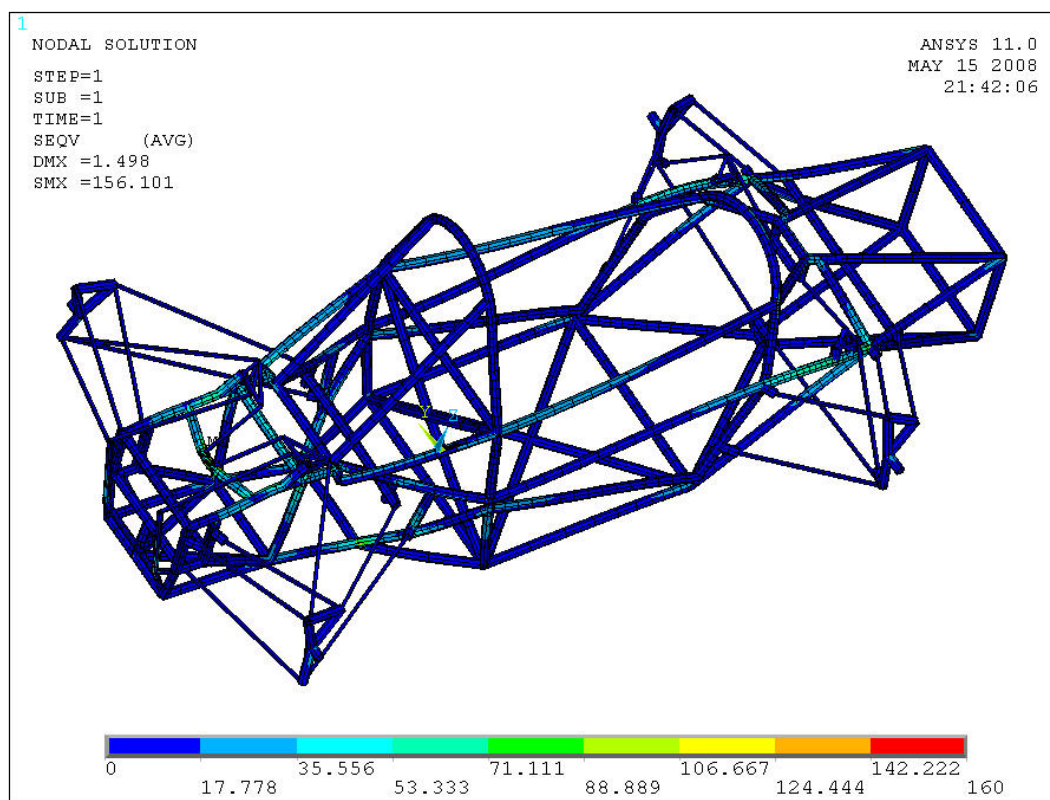


Obr. 41 Okrajové podmínky pro zatížení ohybem

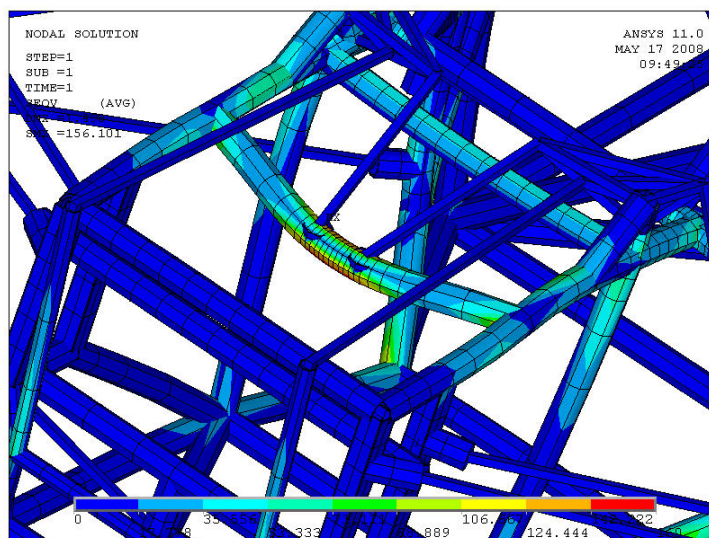
Zatížení bylo zvoleno na hodnotu 3000 N a bude rozloženo dle **obrázku č. 41**. Tedy do obou dolních konců hlavního ochranného oblouku. Je to místo předpokládaného těžiště celého monopostu.

Model rámu je tedy zatížen dvěma silami o velikosti 1500 N v záporném směru osy z.

Výpočet ukázal, že při takovém zatížení dochází ke koncentraci napětí ve spodní části rámu v místech, které opevňuje spodní víko motoru. Napětí v tomto místě, na **obrázku č. 42**, je vyznačeno červenou barvou.



Obr. 42 Výsledek výpočtu



Obr. 43 Detail deformace uchycení zadních tlumičů

Dále dochází k namáhání v místech uchycení náprav. Toto namáhání je způsobeno poklesem rámu v důsledku zatížení. Geometrie náprav tento pokles umožní, nicméně přes systém odpružení a stabilizace se zatížení přeneso na rám. V místech úchytů je koncentrováno napětí.

Přesná analýza průběhu napjatosti v jednotlivých místech uchycení nápravy již není námětem této diplomové práce a proto nebyla prováděna. Je k ní taktéž zapotřebí přesná podoba úchytů, které zatím ještě nejsou známy.

Největší deformace byla zaznamenána v místech uchycení zadních tlumících jednotek. Je zde zapotřebí konstrukčního zásahu, aby bylo zabráněno těmto deformacím a tedy zhoršení jízdních vlastností monopostu. Deformace je znázorněna na **obrázku č. 43**.

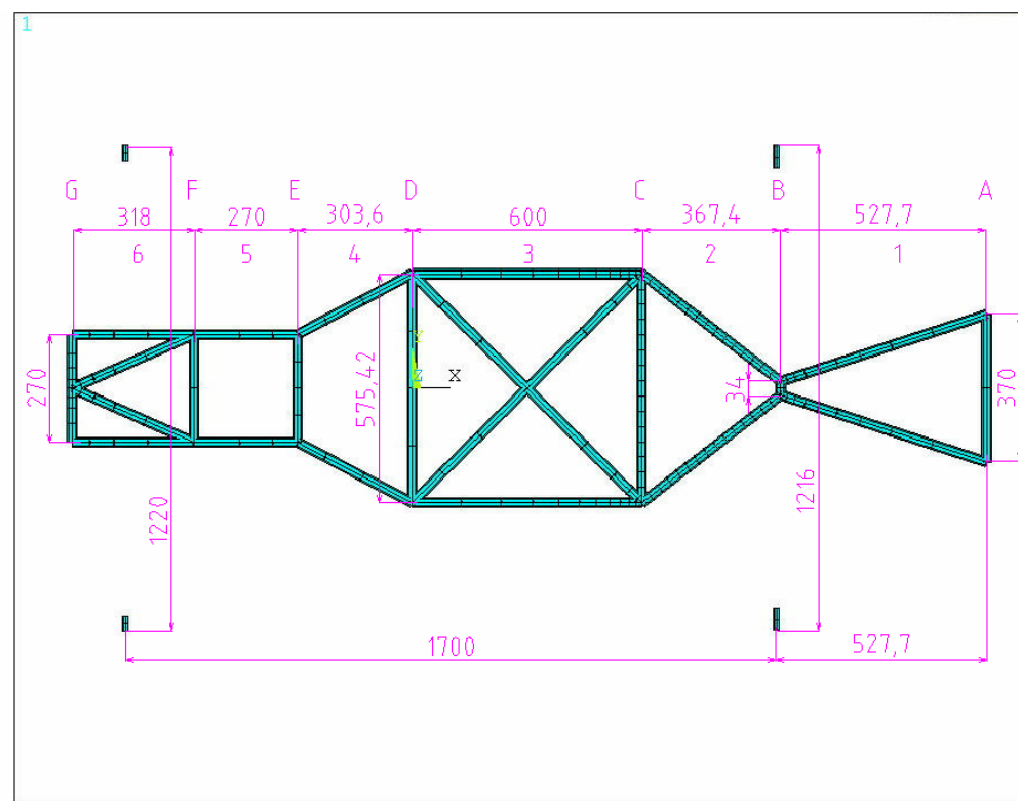
### 10.3 Výpočet torzní tuhosti

Výpočet torzní tuhosti vychází z výpočtového modelu v kapitole 10.1 Zatížení krutem. Z tohoto výpočtu jsou vyňaty hodnoty posunu klíčových bodů pro výpočet torzní tuhosti.

Na **obrázku č. 44** je znázorněna spodní platforma rámu. Jsou zde uvedeny rozměry potřebné pro výpočet torzní tuhosti. Dále jsou očíslovány od jedné do šesti jednotlivé úseky rámu, na kterých bude počítána torzní tuhost. Jsou číslovány od přední k zadní části monopostu. Jednotlivé úseky jsou ohraničeny a označeny písmeny od A po G. Na těchto hranicích byl zjištěn posun v ose y a ose z. viz **tabulka č. 7**. Následným výpočtem byla zjištěna torzní tuhost rámu.

ID	NODE	UY	UZ
1	300	2,793	8,8028
2	380	3,5286	15,679
3	385	3,5286	7,7552
4	545	2,793	4,2072
5	629	3,1188	15,05
6	659	3,7308	23,263
7	677	3,7308	15,808
8	678	3,1188	14,68
9	778	2,2044	4,7175
10	779	0,95268	2,1485
11	851	2,2044	3,0796
12	852	0,95268	0,95465
13	975	3,19E-02	-0,9608
14	1004	3,20E-02	-1,4567
15	2427	-1,21E-04	29,55
16	2439	0	0
17	2448	0	0
18	2458	6,92E-04	0

**tab. 7** hodnoty posunutí jednotlivých bodů



Obr. 44 Pohled ze spod na monopost

Výpočet natočení osy přední nápravy:

$$\tan \alpha = \frac{uz}{B - uy} = \frac{29,55}{1246 - 0,00012} = 0,02371589$$

[rov. 1]

$$\alpha = 1,358566^\circ$$

Výpočet krouticího momentu:

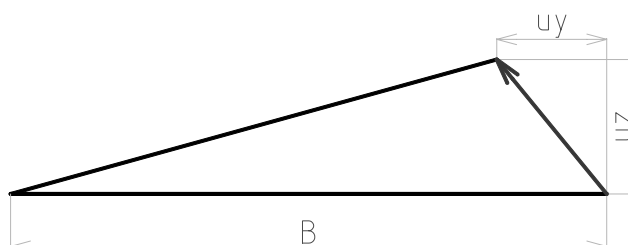
$$Mk = F \times B = 1000 \times 1,246 = 1246 Nm$$

[rov. 2]

Torzní tuhost:

$$C = \frac{Mk}{\alpha} = \frac{1246}{1,358566^\circ} = 917,14 Nm / ^\circ$$

[rov. 3]



Obr. 45

Torzní tuhost na jednotku délky:

$$C_l = C \cdot l = 917,14 \times 1,7 = 1559,14 Nm^2 / ^\circ$$

[rov. 4]

Torzní tuhost po jednotlivých úsecích rámu:

Torzní tuhost na 1. úseku:

Rozdíl natočení míst A-B

$$\alpha_1 = \alpha_A - \alpha_B = 1,154276 - 0,623488 = 0,53^\circ \quad [\text{rov. 5}]$$

$$C_1 = Mk / \alpha_1 = 1246 / 0,53 = 2347,45 \text{ Nm}^\circ \quad [\text{rov. 6}]$$

$$C_{I1} = C_1 \cdot I_1 = 2347,45 \times 0,5377 = 1262,23 \text{ Nm}^2/\circ \quad [\text{rov. 7}]$$

Torzní tuhost na 2. úseku:

Rozdíl natočení míst B-C

$$\alpha_2 = \alpha_B - \alpha_C = 0,790891 - 0,623488 = 0,17^\circ \quad [\text{rov. 8}]$$

$$C_2 = Mk / \alpha_2 = 1246 / 0,17 = 7443,13 \text{ Nm}^\circ \quad [\text{rov. 9}]$$

$$C_{I2} = C_2 \cdot I_2 = 7443,13 \times 0,3674 = 2734,6 \text{ Nm}^2/\circ \quad [\text{rov. 10}]$$

Torzní tuhost na 3. úseku:

Rozdíl natočení míst C-D

$$\alpha_3 = \alpha_C - \alpha_D = 0,790891 - 0,458716 = 0,33^\circ \quad [\text{rov. 11}]$$

$$C_3 = Mk / \alpha_3 = 1246 / 0,33 = 3881,35 \text{ Nm}^\circ \quad [\text{rov. 12}]$$

$$C_{I3} = C_3 \cdot I_3 = 3881,35 \times 0,6 = 2328,81 \text{ Nm}^2/\circ \quad [\text{rov. 13}]$$

Torzní tuhost na 4. úseku:

Rozdíl natočení míst D-E

$$\alpha_4 = \alpha_D - \alpha_E = 0,458716 - 0,347569 = 0,11^\circ \quad [\text{rov. 14}]$$

$$C_4 = Mk / \alpha_4 = 1246 / 0,11 = 11210,39 \text{ Nm}^\circ \quad [\text{rov. 15}]$$

$$C_{I4} = C_4 \cdot I_4 = 11210,39 \times 0,3096 = 3470,74 \text{ Nm}^2/\circ \quad [\text{rov. 16}]$$

Torzní tuhost na 5. úseku:

Rozdíl natočení míst E-F

$$\alpha_5 = \alpha_E - \alpha_F = 0,347569 - 0,253341 = 0,09^\circ \quad [\text{rov. 17}]$$

$$C_5 = Mk / \alpha_5 = 1246 / 0,09 = 13223,28 \text{ Nm}^\circ \quad [\text{rov. 18}]$$

$$C_{I5} = C_5 \cdot I_5 = 13223,28 \times 0,27 = 3570,29 \text{ Nm}^2/\circ \quad [\text{rov. 19}]$$

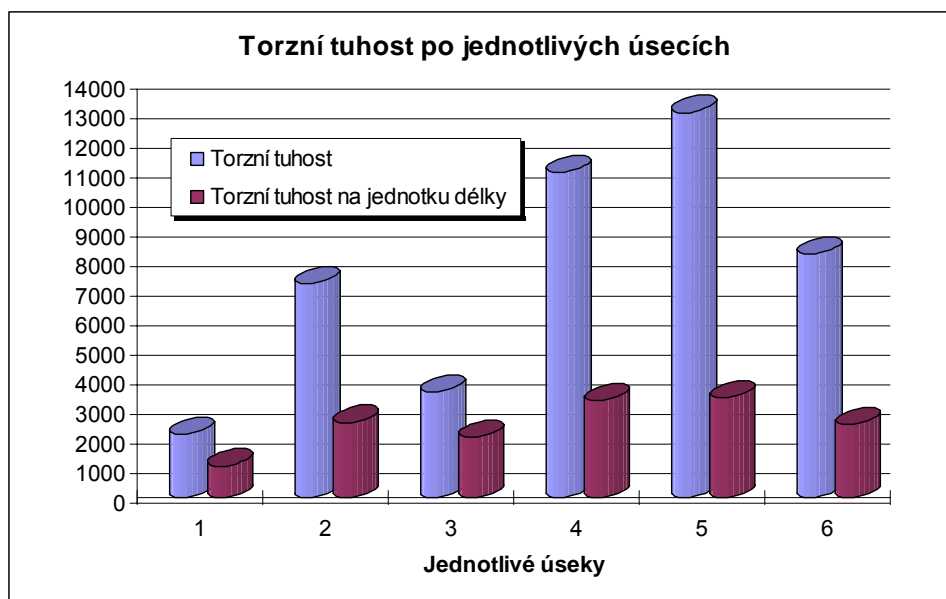
Torzní tuhost na 6. úseku:

Rozdíl natočení míst F-G

$$\alpha_6 = \alpha_F - \alpha_G = 0,253341 - 0,105229 = 0,15^\circ \quad [\text{rov. 20}]$$

$$C_6 = Mk / \alpha_6 = 1246 / 0,15 = 8412,54 \text{ Nm}^\circ \quad [\text{rov. 21}]$$

$$C_{I6} = C_6 \cdot I_6 = 8412,54 \times 0,318 = 2675,19 \text{ Nm}^2/\circ \quad [\text{rov. 22}]$$



**Obr. 46** Graf torzní tuhosti na jednotlivých úsecích

Celková hodnota torzní tuhosti monopostu měřená na základě posunutí středů kol při zatěžování je 917,14 Nm/deg. Přepočítáme-li tuto hodnotu na jeden metr délky, dostaneme se k číslu 1559,14 Nm²/deg.

Dosažený výsledek torzní tuhosti není uspokojivý. První generace dosáhla hodnot blízkých se 2000 Nm²/deg. V této oblasti má rám stále ještě rezervy. Nicméně hmotnost rámu se výrazně snížila. Rám nyní váží 28 kg.

Z vypočítaných hodnot torzní tuhosti po jednotlivých úsecích dále vyplývá, že nejmenší hodnota torzní tuhosti na jednotku délky je na prvním úseku. Je to úsek před přední nápravou. Hodnota torzní tuhosti zde dosahuje 1262,23 Nm²/deg. Zde se tedy rám nejvíce kroutí.

Zvýšení torzní tuhosti v tomto úseku povede nejspíš k nárůstu hmotnosti přední části monopostu a nebude mít rozhodující vliv na celkovou torzní tuhost rámu. Může mít pouze vliv na rozložení hmotnosti mezi přední a zadní nápravu, což v konečném důsledku bude mít pozitivní efekt.

## 11 Úprava použitých profilů na rámu

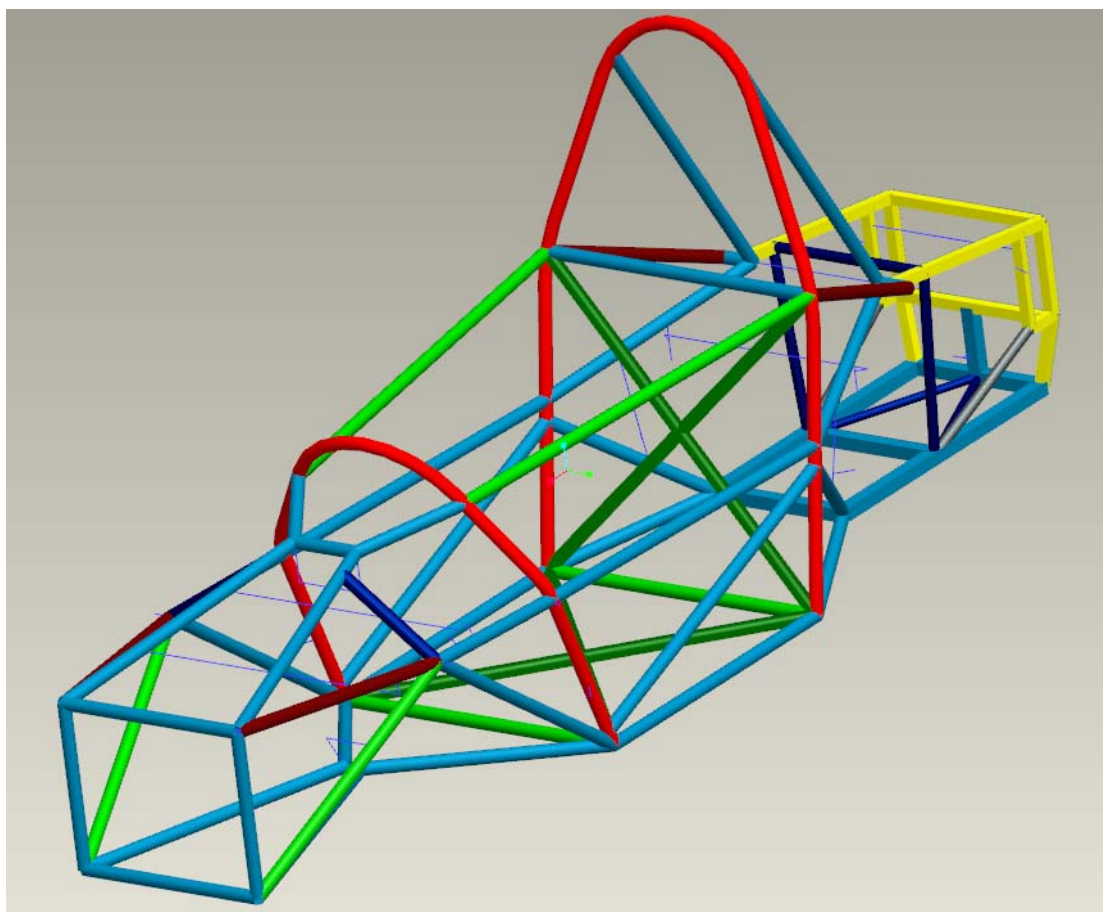
Na základě zjištění v kapitole 10. byla provedena úprava používaných profilů. Na této úpravě bylo spolupracováno s kolegou V.Čípkem, který má na starosti detailní výpočet rámu s ohledem na použité svary. Rozsah výpočtů provedených v této diplomové práci je natolik průkazný, aby věrně popsal tuhost rámu.

Jelikož byly použity dva druhy profilů, bylo žádoucí, aby došlo ke zeštíhlení tam, kde se na rámu nevyskytuje koncentrace napjatosti. Rám byl upraven tak, jak je možné vidět na **obrázku č. 46:**

- Tr Ø25x2,5mm – červená barva – hlavní a přední ochranný oblouk
- Tr Ø25x1,75mm – světle modrá – boční ochranná struktura, všechny namáhané prvky
- Tr Ø25x1,25mm – tmavě červená – výztuhy v přední a zadní části
- Tr Ø25x1mm – světle zelená – výztuhy přední a střední části rámu neupravené pravidly
- Tr Ø20x1,75mm – tmavě modrá – výztuhy v zadní části rámu za motorem



- Tr  $\varnothing 20 \times 1 \text{ mm}$  – tmavě zelená – křížové výztuhy za zády pilota a pod nim se střední části rámu
- Tr  $\varnothing 16 \times 1,75 \text{ mm}$  – modrá barva – výztuhy v přední a zadní spodní části rámu
- Tr  $\varnothing 16 \times 1 \text{ mm}$  – šedá barva – výztuha zadní části rámu
- Tr 4HR 25x1,75mm – modrá barva – zadní spodní část rámu
- Tr 4HR 25x1,25mm – dolní úchyt ramen přední nápravy
- Tr 4HR 20x1,75mm – žlutá barva – zadní část rámu

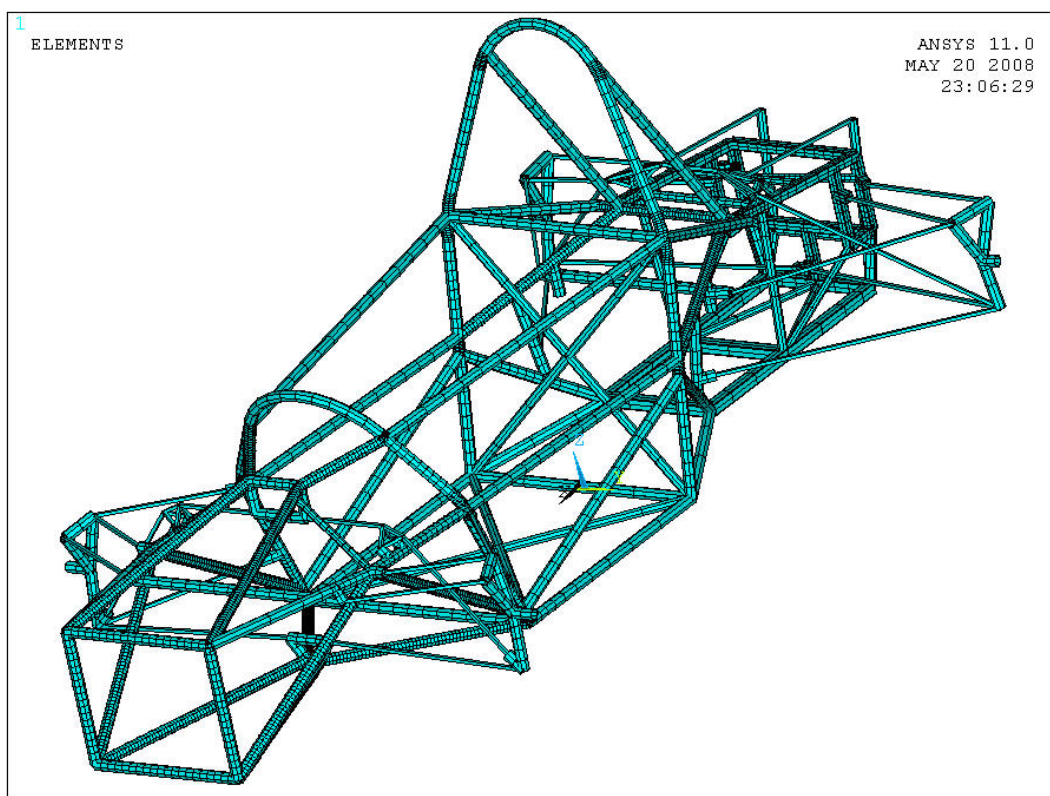


**Obr. 47** Rozdělení materiálu na rámu

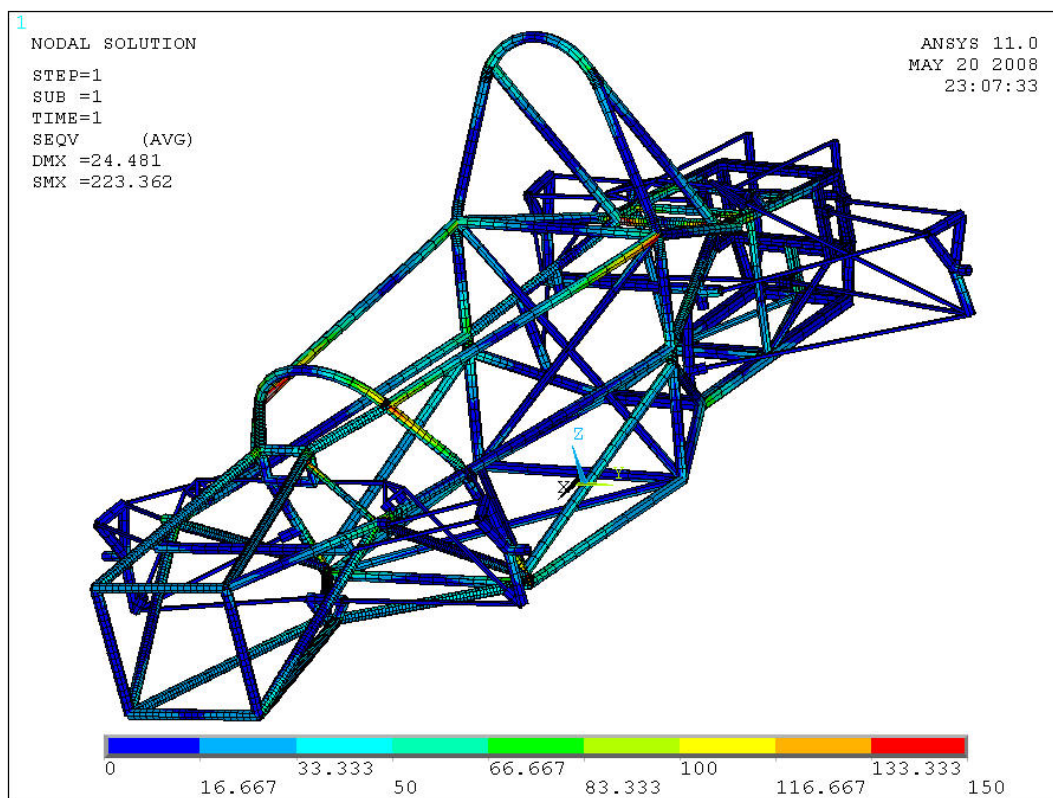
Na základě této změny použitých profilů byl vytvořen nový model v preprocesoru Ansysu a opětovně zatížen stejnými zátěžnými stavy jako předešlý model.

### 11.1 Výpočet zatížení krutem

Byl vytvořen nový model (**obrázek č. 47**) pro výpočet zatížení krutem. Zatížení krutem je určující pro výpočet torzní tuhosti, který teprve ukáže, zda provedené změny vedly ke zlepšení stavu či nikoli. Bylo dosaženo hmotnosti rámu 30 kg. Hodnota hmotnosti je sice vyšší o 2 kg, ale skladba použitých profilů lépe odolává zatížení. Jinými slovy, tam, kde byla zjištěna koncentrace napětí byly profily zesíleny a naopak.



Obr. 48 Nový model rámu – vymeshingovaný

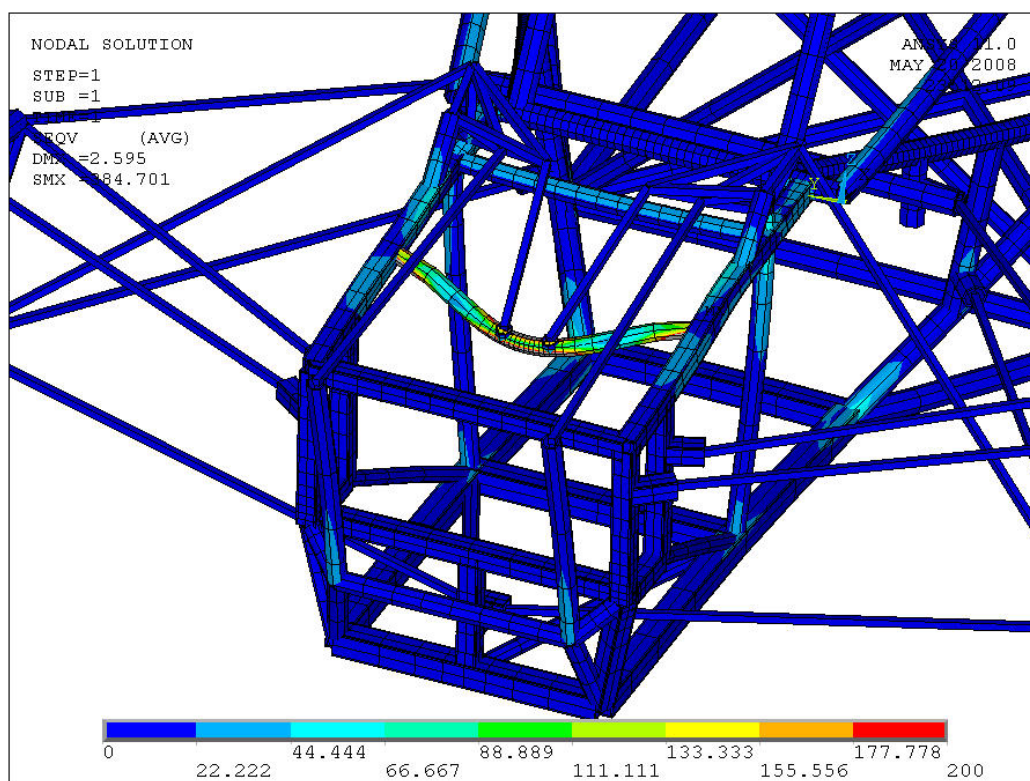


Obr. 49 Znáznorněné výsledky výpočtu

Na **obrázku č. 48** jsou graficky znázorněné výsledky výpočtu v Ansysu. Pro lepší názornost je měřítko zobrazení barevné škály upraveno tak, aby eliminovaly bodové extrémy, tedy chyby výpočtu, které byly způsobeny drátovou konstrukcí modelu. Řešení těchto extrémů není náplní této diplomové práce.

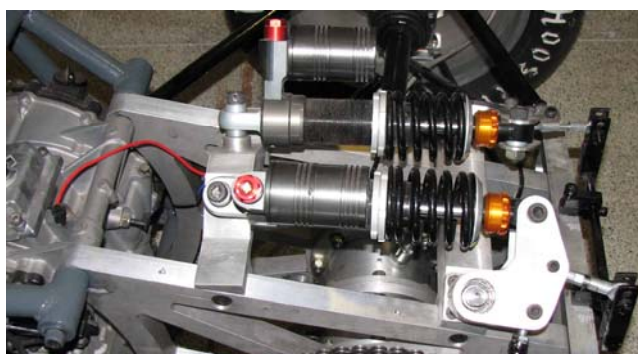
Získané hodnoty slouží jako zdroj informací pro výpočet torzní tuhosti v kapitole 11.3. Vzhledem k dosaženým výsledkům, co se týče maximální hodnoty napjatosti, nevedly provedené změny k velkému nárůstu napjatosti.

## 11.2 Výpočet zatížení ohybem



**Obr. 50** Grafické znázornění výsledků

Na nový model byl aplikován výpočet popsáný v kapitole 10.1. Grafické znázornění výsledku výpočtu je vidět na **obrázku č. 49**. Výsledek nám prokázal, že zatížení 3000 N není pro rám velkou zátěží. Je ovšem potřeba vyřešit přenos zatížení od pružící a tlumící jednotky na rám.

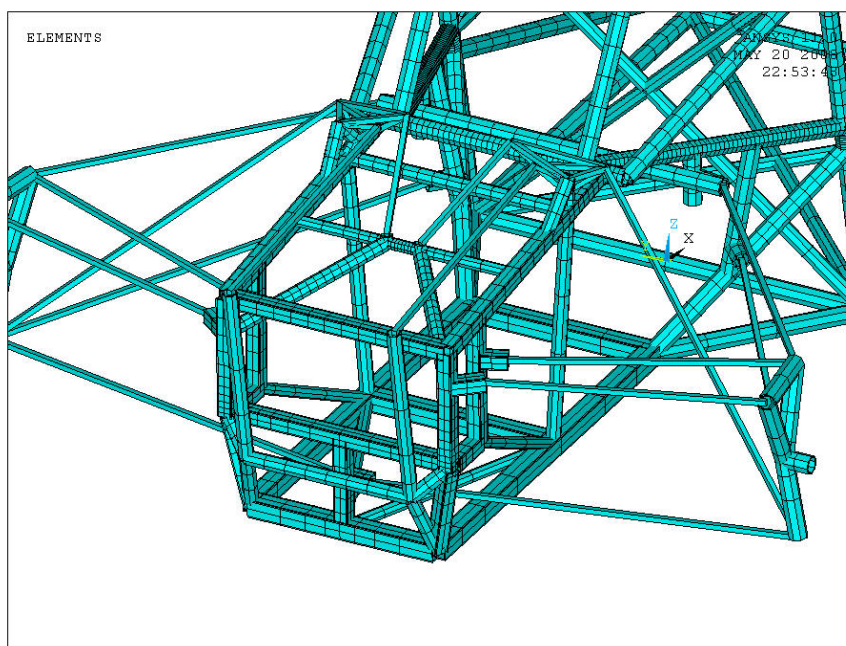


**Obr. 51** Varianta uchycení pružící a tlumící jednotky [12]

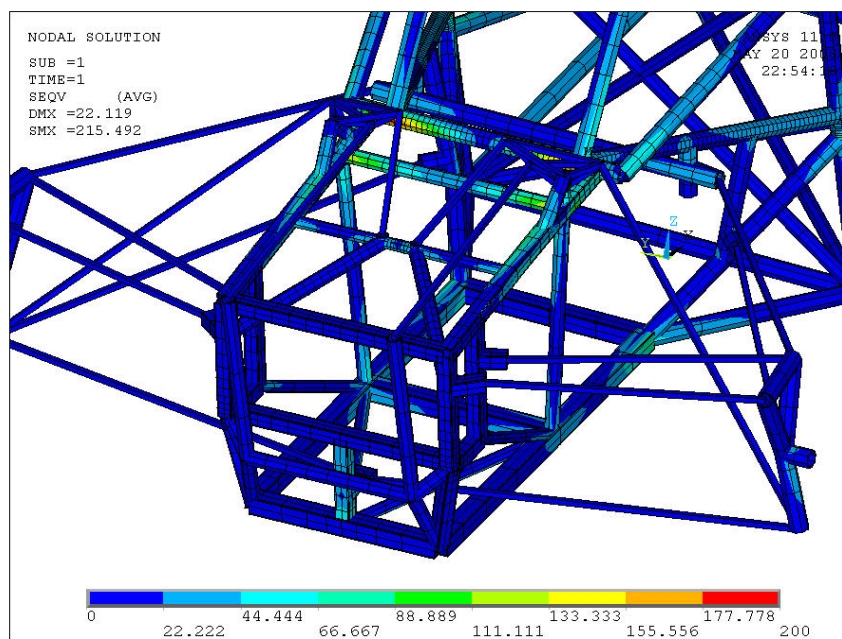


Přenos zatížení je možné provést podobně jako na **obrázku č. 51**. Zde je příčný nosník natvarovaný tak, aby přenesl zatížení na rámovou konstrukci. Pro náš případ je takové řešení obtížně použitelné.

Pro jednoduchost konstrukce bylo však zvoleno řešení pomocí výztuh, jak je možné vidět na **obrázku č. 52**. Výztuhy jsou z ocelových trubek o průměru 16 mm a tloušťky stěny 1 mm. **Obrázek č. 53** ukazuje průběh napjatosti v zadní části rámu. Je vidět, že deformace pod tlumiči je již minimální.



**Obr. 52** Výztuhy v zadní části monopostu



**Obr. 53** Průběh napjatosti v zadní části monopostu

### 11.3 Výpočet torzní tuhosti

Postup výpočtu je shodný s výpočtem v kapitole 10.4. Vstupní hodnoty byly upraveny podle výpočtu provedeného v kapitole 11.2. Byly zjištěny tyto hodnoty pro jednotlivé body:

ID	NODE	UY	UZ	ID	NODE	UY	UZ
1	268	2,1075	6,9938	10	3353	0,62621	1,6679
2	794	2,8338	12,724	11	3434	1,6373	3,7989
3	811	2,8339	6,8028	12	3440	1,6372	2,6676
4	1385	2,1076	3,8165	13	3453	-0,17297	-0,942
5	2252	2,63	12,509	14	3471	-0,17297	-1,092
6	2253	3,038	19,226	15	5525	3,36E-02	24,483
7	2395	3,0378	13,218	16	5559	0	0
8	2396	2,63	12,266	17	5582	0	0
9	3343	0,62621	0,9008	18	5605	1,04E-03	0

tab. 8 Hodnoty bodů

Po dosazení do rovnic č. 1 až č. 22 byly vypočítány následující hodnoty:

Celková torzní tuhost rámové konstrukce: 1111,17 Nm/deg

Celková torzní tuhost na jednotku délky: 1888,6 Nm<sup>2</sup>/deg

Torzní tuhost po úsecích:

Úsek	Torzní tuhost [Nm/deg]	Tor. tuh. na jedn. délky [Nm <sup>2</sup> /deg]
1	2392,85	1286,63
2	6833,48	2510,62
3	4577,39	2746,43
4	16862,43	5220,61
5	17347,29	4683,77
6	10463,99	3327,55

tab. 9 Tabulka výsledků

## 12 Výztuhy

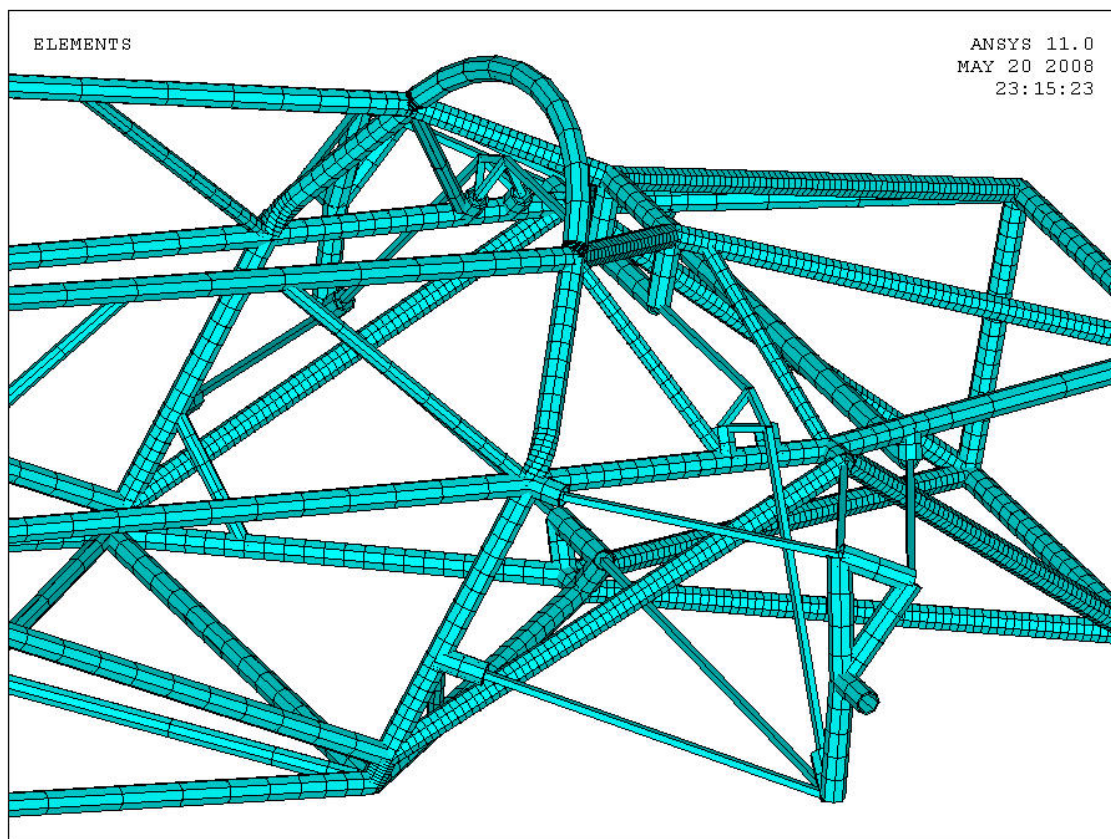
Na základě provedených výpočtů bylo zřejmé, že průběh torzní tuhosti byl již vylepšen. Stále se ale objevují oblasti s koncentrací napjatosti. Jedná se především o místa svarů, kde výpočet není již tak přesný.

Hodnota torzní tuhosti je oproti prvnímu výpočtu vyšší. Stále ale ještě nedosahuje hodnot první generace rámové konstrukce, kde se pohybuje okolo 2000 Nm<sup>2</sup>/deg. Další zvýšení torzní tuhosti druhé generace rámové konstrukce je možné dvěma způsoby:

- 1) Další úpravou použitých profilů – což vede ke zvýšení hmotnosti v důsledku toho, že změna se nebude týkat pouze krátké oblasti, ale celé délky profilu.
- 2) Použití výztuh do míst, kde se koncentruje napětí – tato varianta je vhodnější. Nedochází k nárůstu hmotnosti po celé délce profilu, ale pouze v konkrétním místě

Pro další vývoj rámové konstrukce s cílem dosažení vyšší torzní tuhosti s minimálním nárůstem hmotnosti byla zvolena kombinace obou variant.

Došlo k úpravě přední části monopostu, kde byly trubkové profily v horní části konstrukce zesíleny. Přední část byla vyztužena trubkami o průměru 16 mm a tloušťkou stěny 1 mm ve spodní a horní části konstrukce mezi přední nápravou a předním ochranným obloukem, jak je vidět na **obrázku č. 52**.

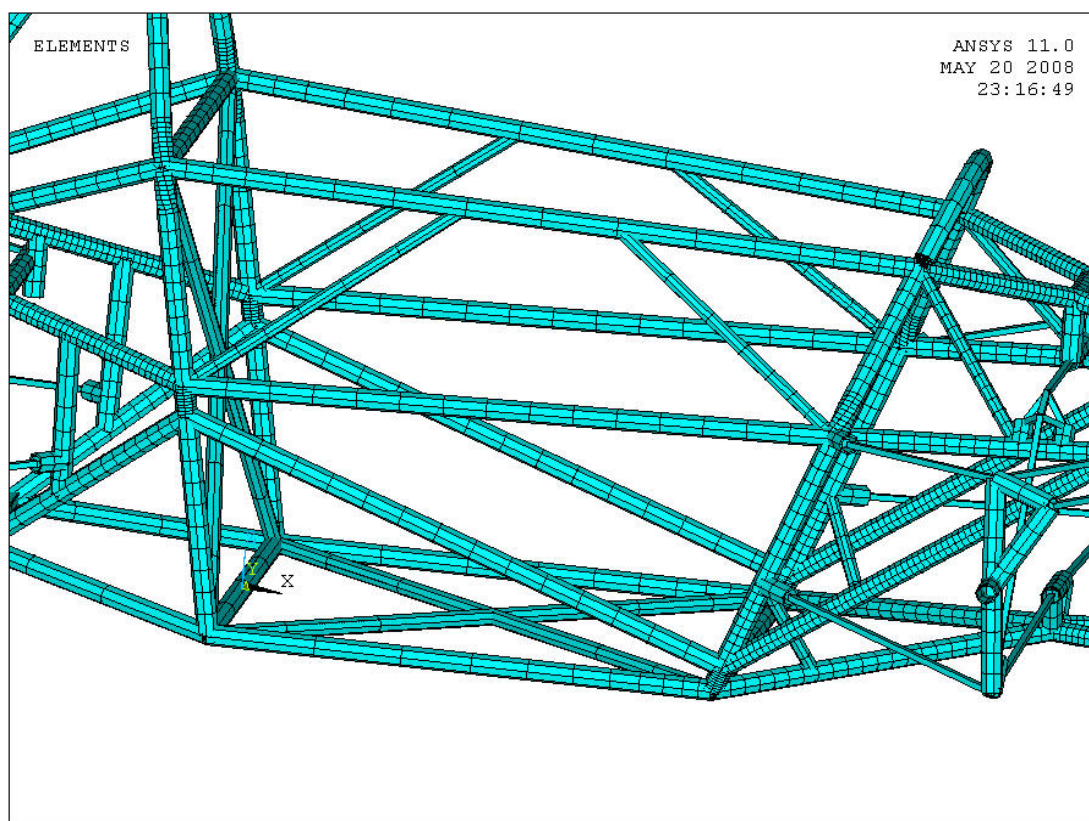


**Obr. 54** Výztuhy v přední části monopostu

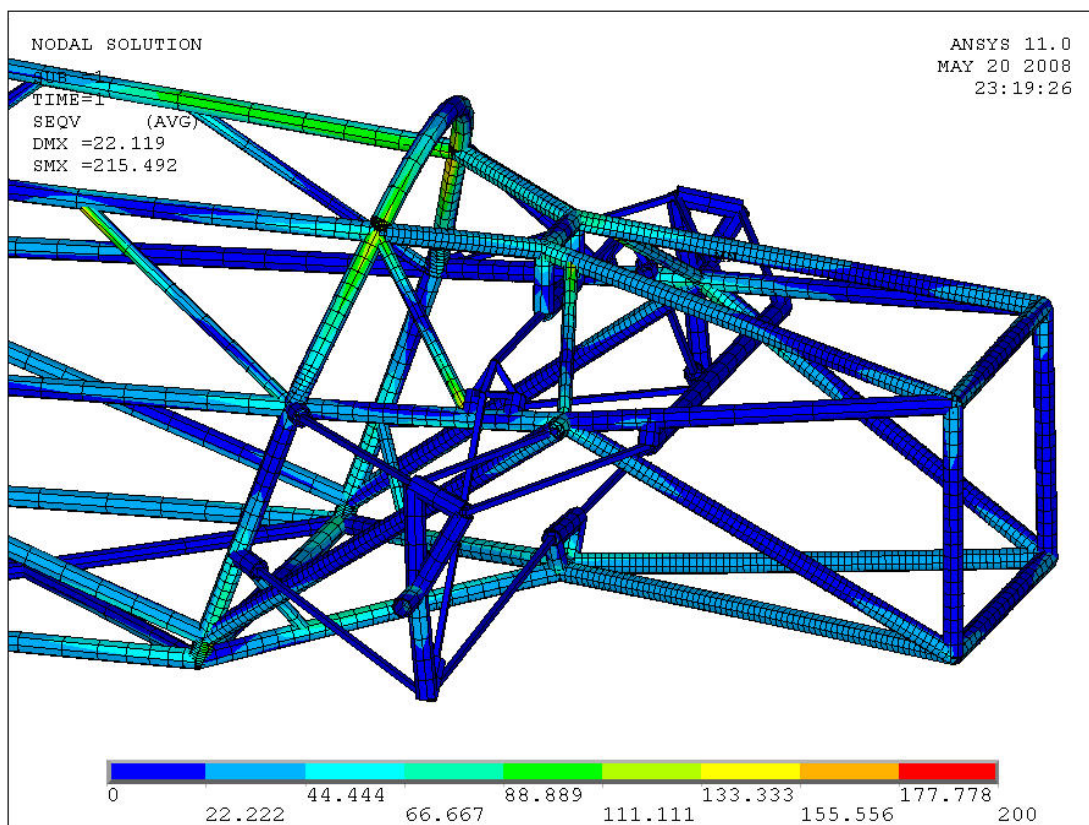
Další výztuhy byly umístěny do střední části monopostu, do míst vedle pilotova trupu, jak je patrné z **obrázku č. 55**.

Deformace v jednotlivých částech jsou zobrazeny na obrázcích č. 56 a č. 57. Z těchto obrázků je patrné, že nastalo zlepšení průběhů napjatosti v jednotlivých částech rámové konstrukce. Těmito změnami narostla hmotnost rámu pouze nepatrně, nicméně torzní tuhost se výrazně zvýšila. Nyní dosahuje hodnoty  $2090,76 \text{ Nm}^2/\text{deg}$

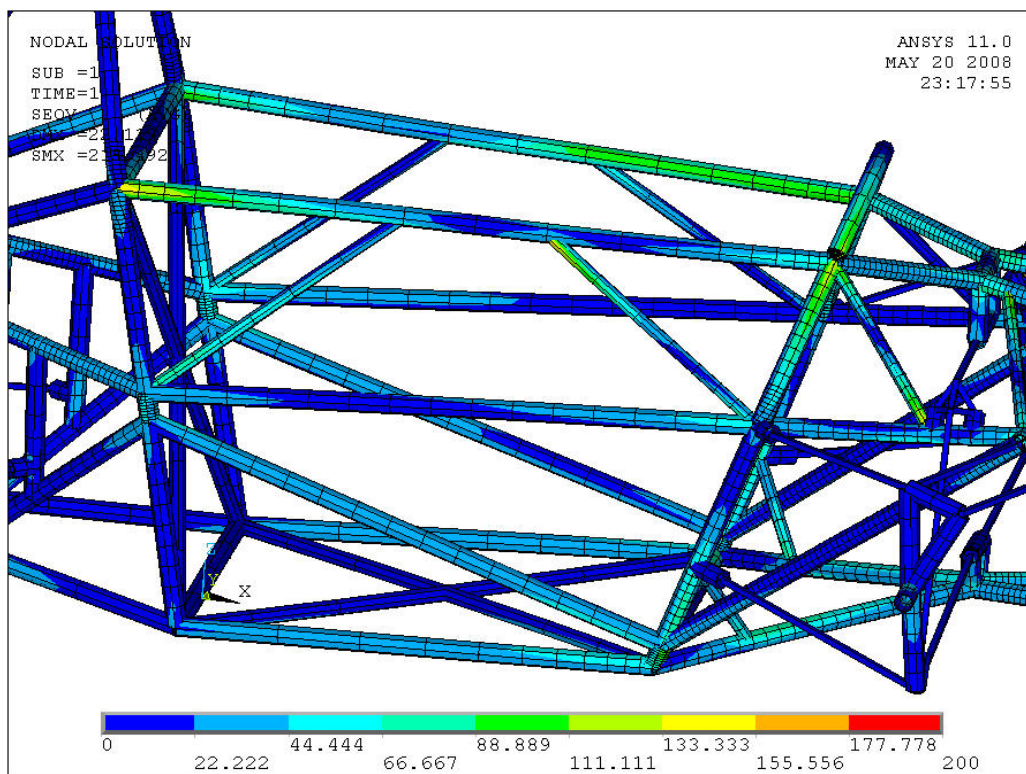




Obr. 55 Střední část rámové konstrukce



Obr. 56 Průběh napjatostí a deformací v přední části monopostu



Obr. 57 Průběh napjatostí a deformací ve střední části monopostu

### 13 Analýza výsledků

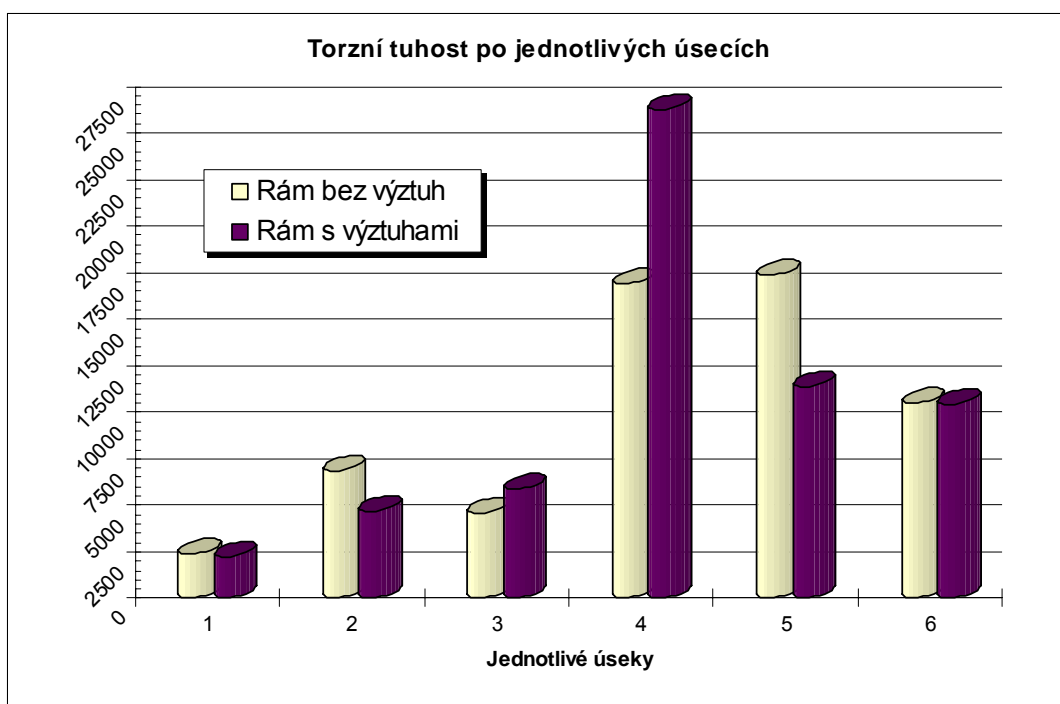
Využitím výztuh bylo dosaženo zvýšení torzní tuhosti. Hodnota torzní tuhosti rámu se pohybuje na hodnotě 2090,76 Nm<sup>2</sup>/deg. Toto navýšení bylo ovšem na úkor hmotnosti. Ta narostla na hodnotu 35,5 kg. Průběh torzní tuhosti po jednotlivých úsecích vypadá následovně:

Úsek	Torzní tuhost [Nm/deg]	Tor. tuh. na jedn. délky [Nm <sup>2</sup> /deg]
1	2242,52	1205,8
2	4693,81	1724,51
3	5875,1	3525,06
4	26270,47	8133,34
5	11385,06	3073,97
6	10438,88	3319,56

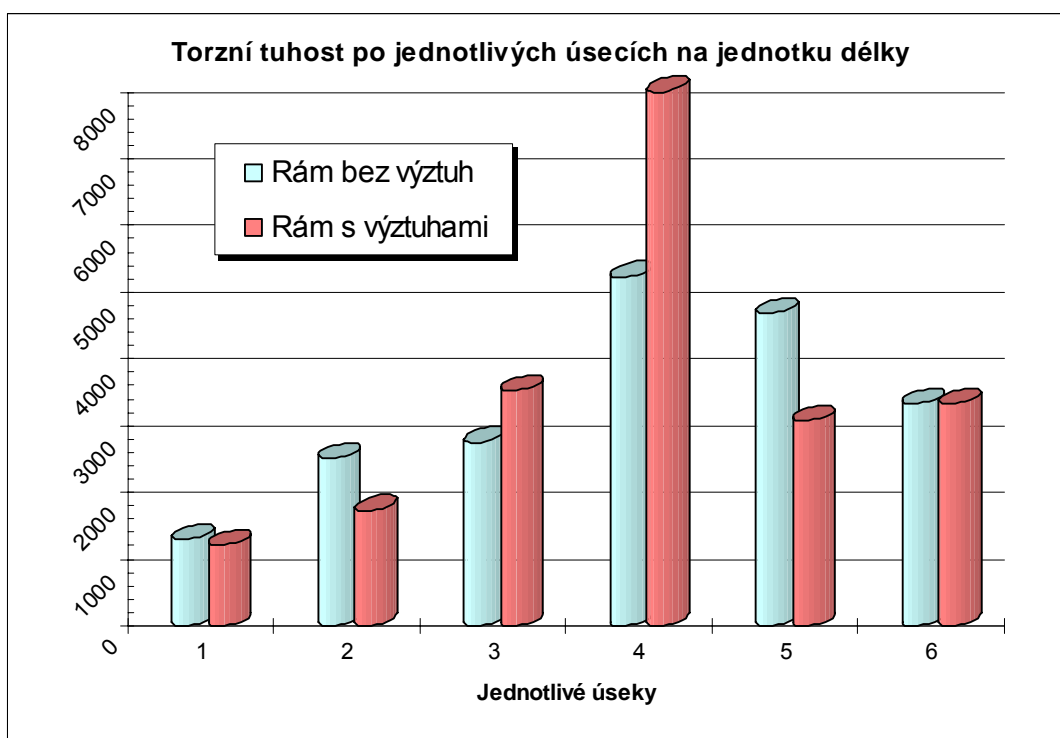
tab. 10 Tabulka výsledků

#### 13.1 Porovnání dosažených výsledků

Pro snazší porovnání byly jednotlivé výsledky vyneseny do grafů - **obrázky č. 58 a č. 59**. Z těchto hodnot je patrné, že při úpravě profilů a vyztužení konstrukce rámu, došlo nejen k nárůstu torzní tuhosti, ale zvýšila se i hmotnost.



**Obr. 58** Torzní tuhost na jednotlivých úsecích v grafu



**Obr. 59** Torzní tuhost na jednotku délky na jednotlivých úsecích v grafu

Z grafů průběhu torzní tuhost na jednotlivých úsecích rámu, vyobrazené na **obrázcích č. 58** a **č. 59**, je zřejmé, že využití výztuh má velký vliv na torzní tuhost v jednotlivých úsecích konstrukce prostorového trubkového rámu. Výrazné zlepšení torzní tuhosti je vidět ve třetím a čtvrtém úseku, tedy v místech umístění trupu pilota a mezi hlavním ochranným

obloukem a motorem. Naopak je patrný výrazný pokles v druhém a pátém úseku rámové konstrukce. V těchto místech se nachází nohy pilota, respektive motor.

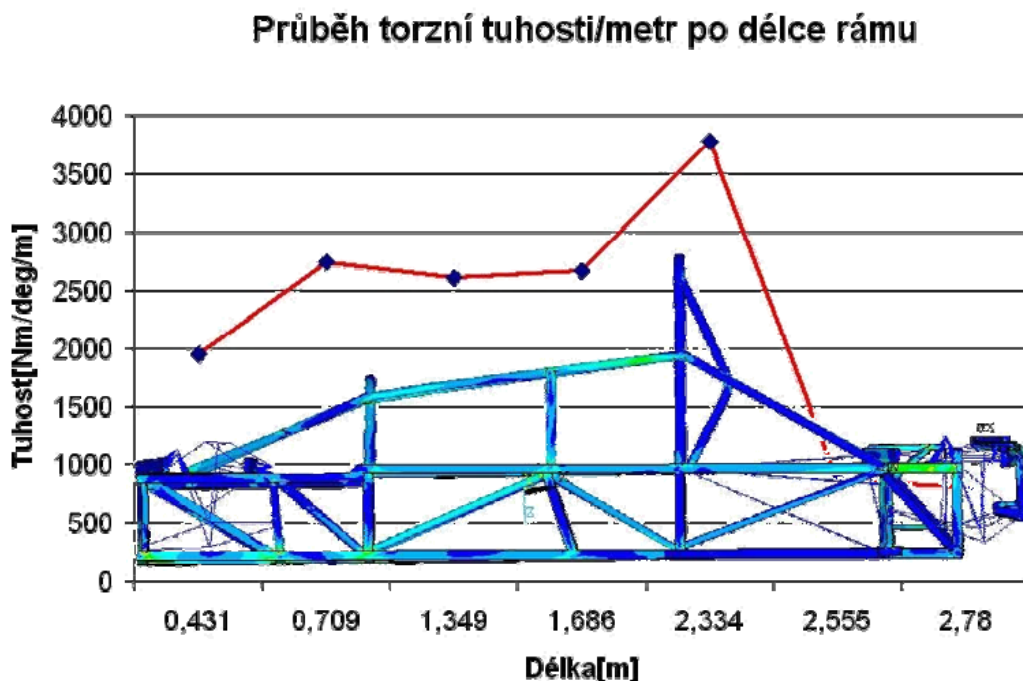
Jelikož byl rám počítán bez motoru, je předpoklad, že po montáži motoru do rámu také vzroste torzní tuhost rámové konstrukce v jeho blízkosti, tedy v pátém úseku, jak to vyplývá z diplomové práce Ing. Petra Hajduška [5].

Navzdory poklesu torzní tuhosti v úsecích č. 2 a č. 5 celková torzní tuhost vzrostla.

Hmotnost takto navrženého rámu je odhadována na 36,5 kg. Oproti první generaci je to zlepšení o 6,5 kg.

### 13.1.1 Formule FORD

Formule Ford je soutěžní monopost formulového typu. Má podélně zabudovaný čtyřválcový řadový motor o objemu 1,6 l umístěný za řidičem před zadní nápravou. Motor podává výkon 89 kW při 6800/min a maximální točivý moment 158 Nm při 4200/min. Pohon monopostu obstarává zadní náprava, která je spřažena s motorem přes přímo řazenou čtyřstupňovou bezsynchronní převodovku Hewland 202.



Obr. 60 Průběh torzní tuhosti na Formuli Ford [5]

Na základě zjištění torzní tuhosti na rámu Formule Ford, vyobrazeném na **obrázku č. 60**, bylo provedeno srovnání s výsledky naměřenými na modelu nového rámu. Celková torzní tuhost, zjištěná na Formuli Ford, je 779,2 Nm<sup>2</sup>/deg. Tato hodnota je ovlivněna výrazně měkčí zadní částí monopostu, kde je připojena zadní náprava.

Formule Ford je vlastně velice podobná Formuli Student. Jedná se taky o monopost bez aerodynamických prvků. Hlavní rozdíl je v uložení pilota. Jako u jiných „dospělých“ motoristických soutěžích i u Formule Ford musí být nohy pilota za osou přední nápravy. Jedná se o bezpečnostní opatření. U Formule Student toto pravidlo není. Je to zapříčiněno především charakterem jednotlivých disciplín, kdy je pilot na okruhu vlastně sám a tudíž nebezpečí kolize je nižší.

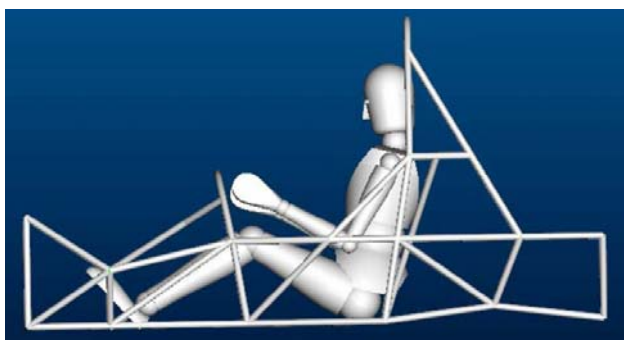


### 13.1.2 První generace rámové konstrukce

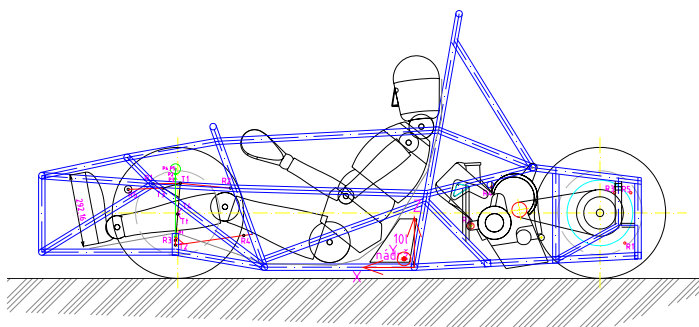
První generace rámové konstrukce formulového vozu Formule Student týmu VUT v Brně je zastoupena dvěma variantami rámu. Oba dosáhly velice podobné torzní tuhosti vykoupené zvýšenou hmotností rámu. Jak již bylo napsáno, jeden rám má hodnotu torzní tuhosti 1996 Nm/deg, respektive 1992,8 Nm/deg, při hmotnosti rámu 43 kg. Hmotnost druhého rámu není známá.

Při porovnání s oběma rámy je na první pohled jasné, že nastal pokles hodnoty torzní tuhosti. Je to nepříznivý jev. Na druhou stranu nastal též pokles hmotnosti, bylo zlepšeno rozložení hmotnosti, které se nyní přiblížilo ideálnímu rozložení 50:50, došlo ke snížení polohy těžiště. Zlepšení bylo dosaženo především vhodnějším umístěním jednotlivých prvků monopostu.

Změna polohy pilota, kdy vzpřímená poloha pilota (**obrázek č. 61**) byla nahrazena mnohem vhodnější polohou (**obrázek č. 62**). To vedlo nejen ke změně rozložení hmotnosti, ale i k celkově nižšímu aerodynamickému odporu zapříčiněnou nižší stavbou monopostu.



Obr. 61 Poloha pilota [6]



Obr. 62 Poloha pilota

## 13.2 Návrh opatření

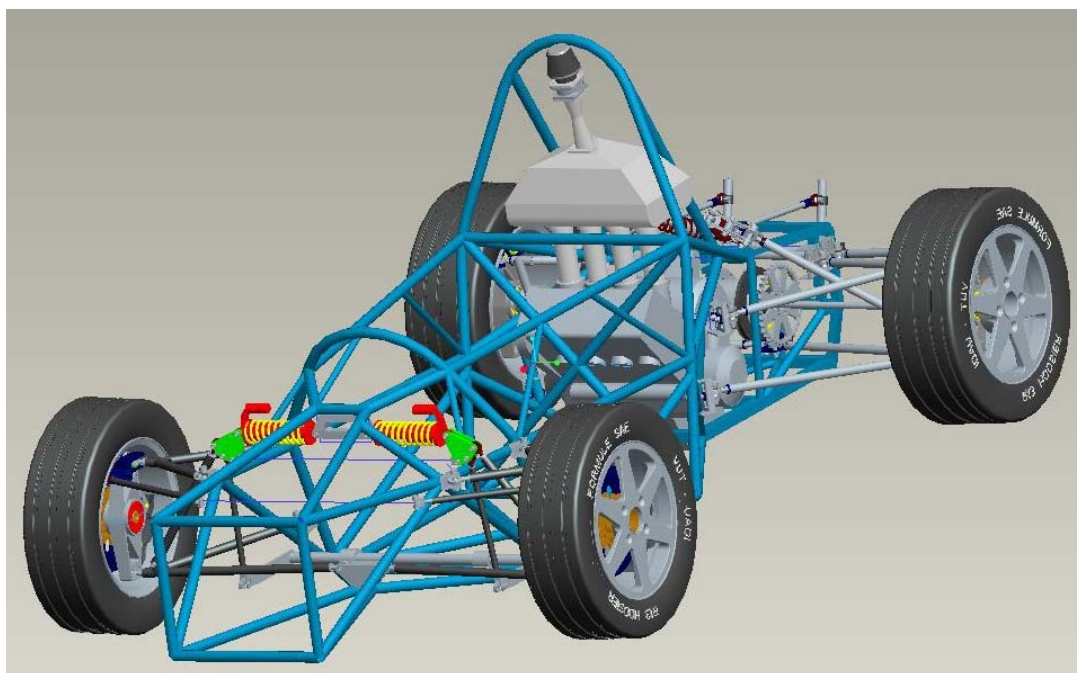
Opatření vedoucí ke zvýšení torzní tuhosti a zároveň ke snížení hmotnosti, jsou žádoucí především v přední části rámu. Vzhledem ke komplexnějšímu pohledu na problematiku torzní tuhosti a kompletace modelu celého monopostu, což je námětem této práce, již nezbyvá prostor pro detailní řešení jednotlivých dílčích detailů.

Proto je zde pouze uvedeno doporučení, kudy je možné se ubírat v dalším vývoji navržené rámové konstrukce Formule Student.

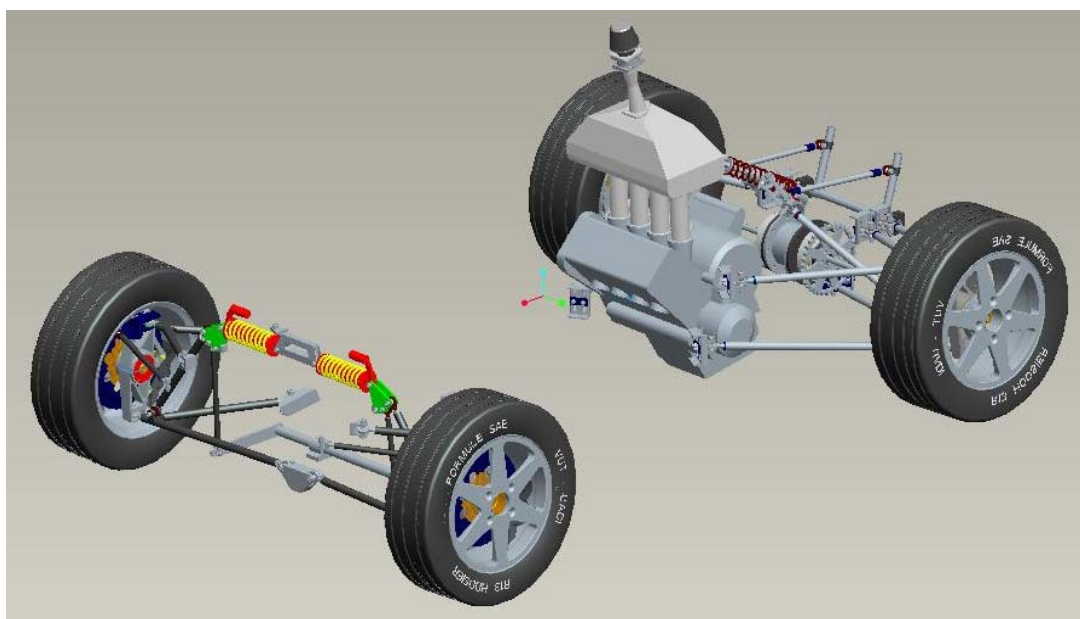
Při dalším vývoji prostorového trubkového rámu druhé generace je třeba se zaměřit především na přední část rámu, tedy od čelní části monopostu po přední ochranný oblouk. Je zde zapotřebí zvýšení torzní tuhosti konstrukce. To nejspíš povede k nárůstu hmotnosti v této části rámové konstrukce. Je třeba najít vhodný kompromis.

## 14 Kompletace jednotlivých komponent monopostu

Monopost studentské formule se skládá z mnoha dílčích celků. Není v silách jednotlivce detailně rozpracovat každý z těchto celků, proto byla práce rozdělena mezi ostatní studenty. Jedním z cílů této diplomové práce je také kompletace dílčích celků do jednoho modelu celého monopostu.

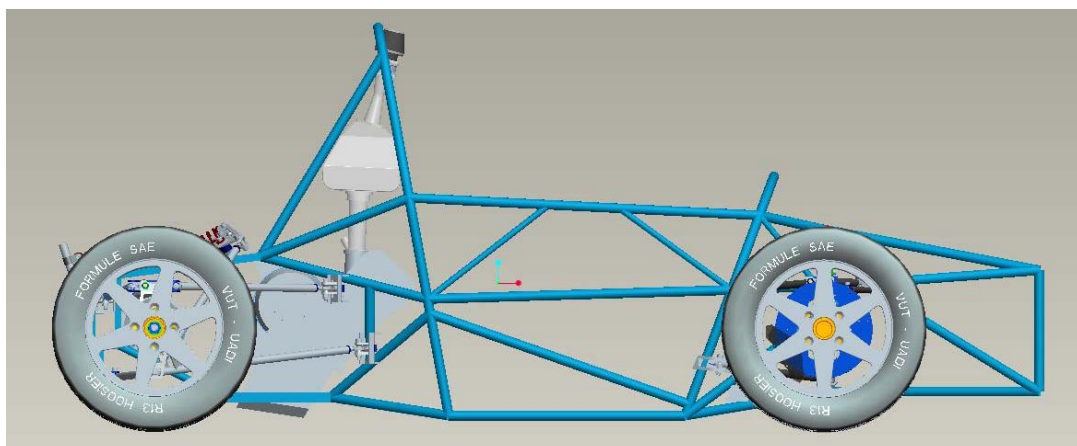


Obr. 63 Přední pohled

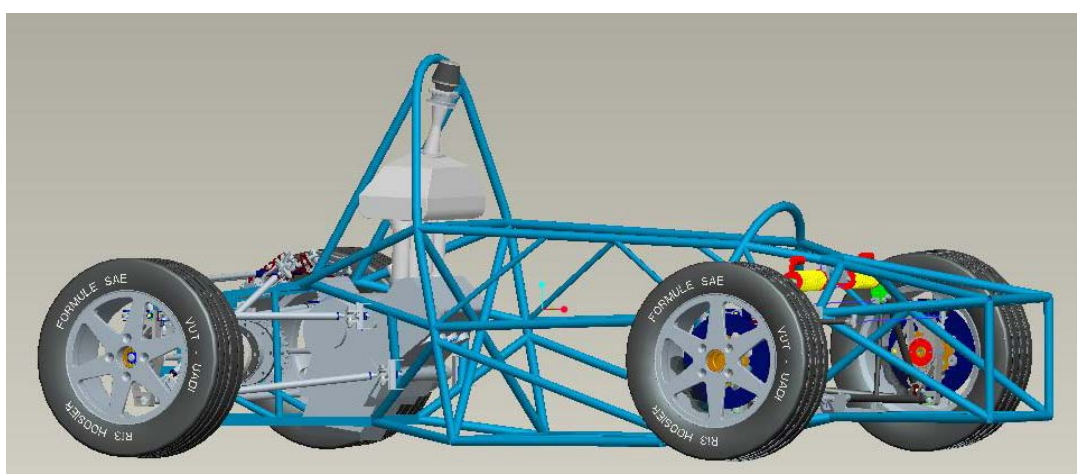


Obr. 64 Monopost bez rámové konstrukce

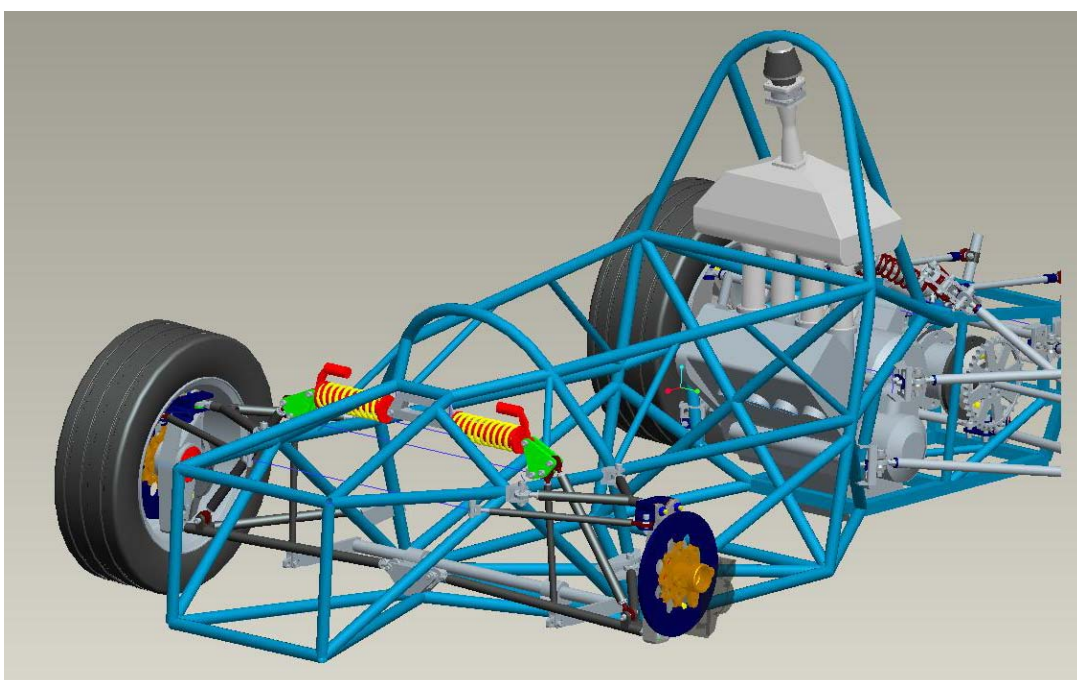




Obr. 65 Pohled z boku



Obr. 66 Monopost VUT v Brně



Obr. 67 Monopost VUT v Brně

## 15 Závěr

Na základě zadání diplomové práce byla vytvořena druhá generace prostorového trubkového rámu Formula Student VUT v Brně. Navržený prostorový trubkový rám odpovídá pravidlům soutěže pro rok 2007, které jsou platné i pro rok 2008, zároveň plní nároky kladené jednotlivými prvky potřebnými pro provoz monopostu tak, aby byly zajištěny ideální jízdní vlastnosti.

Během vývoje druhé generace rámové konstrukce formulového monopostu Formula Student VUT v Brně vznikla celá řada různých řešení. Vzhledem k tomu, že vývoj začínal vlastně od začátku, protože nápravy z první generace byly kompletně přepracovány, vznikl rám společně s nápravami a do jisté míry se jim přizpůsoboval. Proto nebylo možné v prvních fázích vývoje podrobovat každou verzi rámové konstrukce náročnému výpočtu.

V první fázi vývoje byla ustanovena koncepce rámové konstrukce tak, aby vyhověla požadavkům jednotlivých prvků na tuto konstrukci potřebných pro provoz monopostu (jsou to motor, pilot, nápravy a jiné). Jakmile byla podoba náprav a tedy i úchyty náprav k rámu známa, mohlo dojít k ustálení podoby rámu.

Nyní mohl teprve začít náročný výpočtový cyklus, kdy bylo zkoumáno, které místa je třeba vyztužit a které je možno odlehčit. První model, který byl podroben výpočtu, vycházel z prostorového návrhu. Materiál a profily byly zvoleny co nejjednodušší. Výpočet teprve ukázal možnosti rámu a podle získaných hodnot došlo k dalšímu vývoji, tedy vyztužení nebo odlehčení vhodných částí konstrukce.

Při vývoji rámové konstrukce docházelo k určitým změnám v konstrukci. Vzhledem k tomu, že se jedná o kolektivní dílo, byly tyto změny konzultovány s kolegy pracujícími na prvcích, které tato změna ovlivní nejvíce. Jedná se především o obě nápravy na kterých pracovali Tomáš Honzík na přední nápravě a Pavel Tomášek na nápravě zadní. Některé změny se dotkly i těhlic na obou nápravách, a proto bylo třeba konzultace i s Romanem Vymazalem, který se zabýval konstrukcí obou těhlic. Konzultace probíhaly také s vedoucím této diplomové práce Ing. Pavlem Ramíkem, který dokázal poradit především s výpočtem v programu Ansys a doplnil rámovou konstrukci o poznatky z praxe. Další poznatky z praxe doplnil vedoucí diplomových prací obou náprav Ing. Petr Porteš.

Při finálním návrhu bylo vycházeno ze všech připomínek a doporučení výše jmenovaných a ty byly doplněny tak, aby výsledná rámová konstrukce byla co nejlepší.

Při výpočtu jednotlivých verzí prostorového trubkového rámu vznikalo napětí. Toto napětí bylo podrobeno kontrole tak, aby nepřekročilo mez 400 MPa. Je to přibližně polovina meze kluzu použitého materiálu (mez kluzu oceli 15 230 přesahuje 800 MPa). Jakákoli napjatost, která tuto hranici překročí byla vyhodnocena jako špatná a tedy řešení, vedoucí k této napjatosti, bylo opuštěno. V konečném návrhu se napjatost pohybuje pod hranicí 200 MPa, což znamená, že je rám bezpečný.

Vzhledem k tomu, že pro výpočetní kontrolu rámové konstrukce byl použit pouze drátěný model, kde jednotlivé dráty jsou na místech střednic jednotlivých trubek konstrukce a v Ansysu jim byl přidán průřez tak, aby odpovídaly použitým trubkám daných profilů, docházelo ke koncentraci napjatosti v místech budoucích svarů.

Takové zjednodušení konstrukce je možné pouze při výpočtu torzní tuhosti celého monopostu. Detailním výpočtem rámu s ohledem na použité svary se zabývá jiná diplomová práce. Je to především proto, že výpočet takto podrobného rámu je velmi náročný a nedal se skloubit s vývojem a koordinací ostatních prací na monopostu.

Hodnoty získané při výpočtu popsané v této práci jsou průkazné o kvalitě navrhovaného prostorového trubkového rámu formulového monopostu Formula Student.

V dalším vývoji druhé generace rámové konstrukce již není třeba výrazně zvyšovat torzní tuhost. Je ovšem zapotřebí zvýšit poměr torzní tuhost / hmotnost rámu. V této oblasti již byl zaznamenán pokrok od první generace, nicméně nově navržený rám má stále své rezervy v tomto poměru.

Druhá generace rámové konstrukce se již výrazně přiblížila reálnému monopostu, na kterém by bylo možné provádět jízdní zkoušky a získávat tolik potřebná data pro vývoj rámu v dalších generacích. Tento rám je již připraven tak, aby mohl v reálné podobě plnit svou funkci a umožnit provoz monopostu.

## 16 Literatura

- [1] Vlk, F: Dynamika motorových vozidel. Brno 2000.
- [2] Vlk, F: Úlohy z dynamiky motorových vozidel. Brno 2000.
- [3] [www.formulastudent.com](http://www.formulastudent.com)
- [4] 2007 FORMULA SAE® RULES
- [5] Hajdušek, P. *Rám formulového vozu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství, 2007. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík.
- [6] Kolavík, J. *Návrh rámu Formule SAE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství, 2006. 94 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík.
- [7] <http://www.formula.stadia.fi/>
- [8] [www.eng.buffalo.edu/students/organizations/sae/formula\\_web/](http://www.eng.buffalo.edu/students/organizations/sae/formula_web/)
- [9] [www.rennteam\\_stuttgart.de](http://www.rennteam_stuttgart.de)
- [10] <http://www.universityracing.nl/>
- [11] Release 11.0 Documentation for Ansys
- [12] [http://www.etseib-motorsport.upc.edu/index.php?option=com\\_frontpage&Itemid=1](http://www.etseib-motorsport.upc.edu/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1)

## 17 Seznam použitých symbolů a zkratk

$R_m$	$[MPa]$	Mez pevnosti
$R_e$	$[MPa]$	Mez kluzu
$E$	$[MPa]$	Modul pružnosti v tahu
$\mu$	$[-]$	Poissonovo číslo
$U_Y$	$[mm]$	Posuv v ose Y
$U_Z$	$[mm]$	Posuv v ose Z
$a$	$[mm]$	Rozchod náprav
$B$	$[mm]$	Rozvor náprav
$F$	$[N]$	Síla působící na středu kola
$C$	$[Nm/deg]$	Torní tuhost
$C_a$	$[Nm^2/deg]$	Torzní tuhost na jednotku délky
$\alpha$	$[deg]$	Úhel natočení rámu